

ニュートリノ物理学

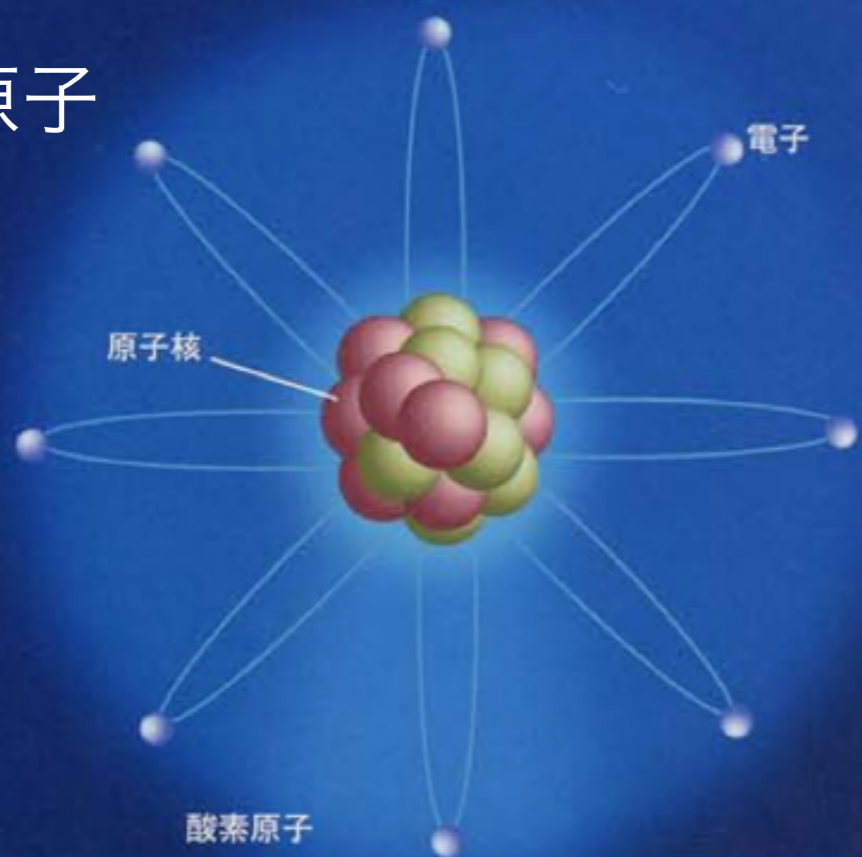
奥村 公宏

okumura@icrr.u-tokyo.ac.jp

宇宙線研究所スプリングスクール2019

図A 物質の階層構造 (分子からクォークまで)

原子



原子核

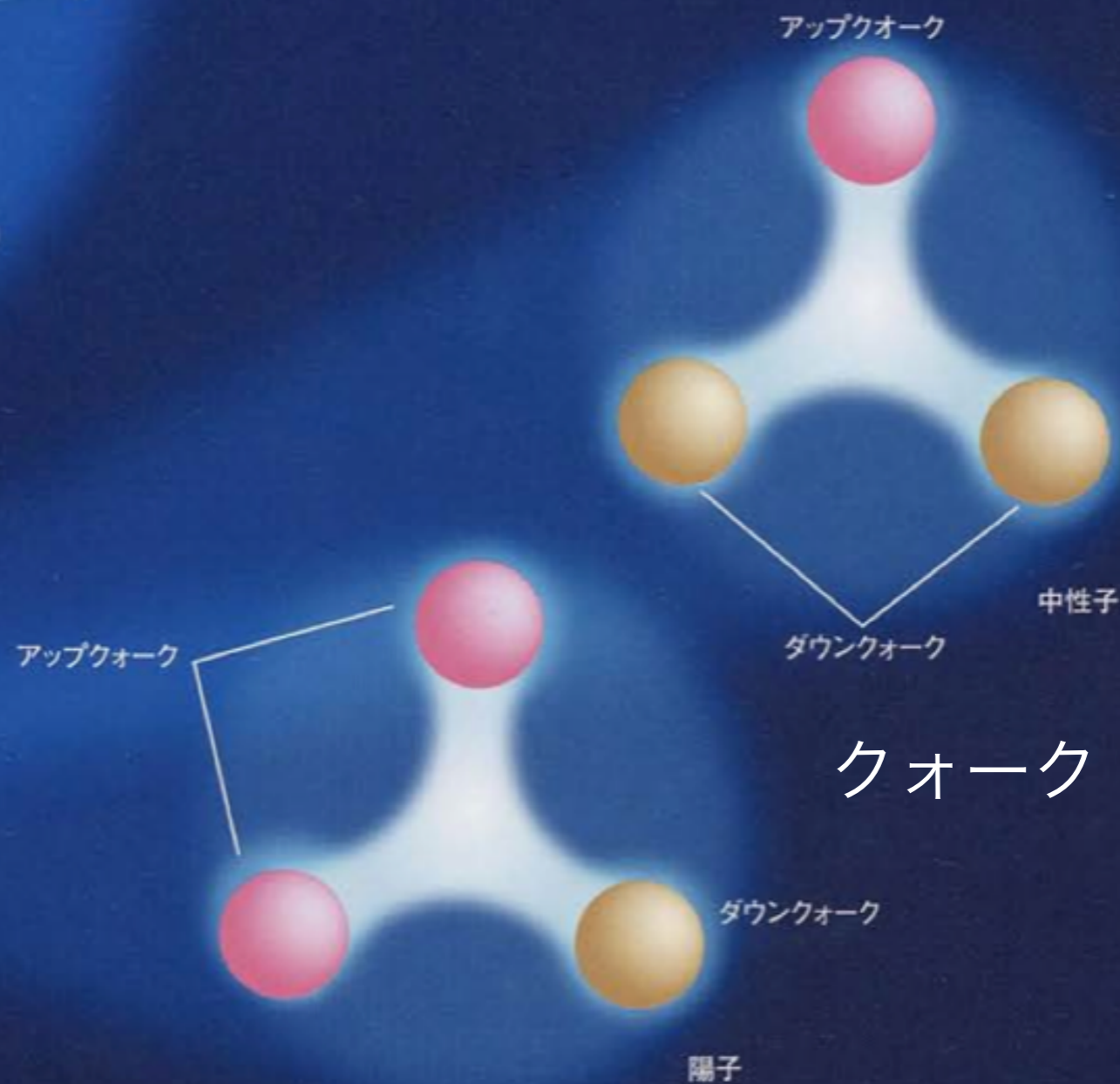


H₂O



図B 物質を構成する素粒子

クォーク		
アップ	チャーム	トップ
ダウン	ストレンジ	ボトム
第1世代	第2世代	第3世代
電子	ミュー	タウ
電子ニュートリノ	ミューニュートリノ	タウニュートリノ
	レプトン	



物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ u	 チャーム c	 トップ t
	 ダウン d	 ストレンジ s	 ボトム b
レプトン	 eニュートリノ ν_e	 μニュートリノ ν_μ	 τニュートリノ ν_τ
	 電子 e	 ミューオン μ	 タウ τ

クォーク
陽子や中性子を構成

レプトン
電子など

ニュートリノ

その他 (力を媒介する粒子)
 光子 (電磁力)
 W^\pm 、 Z^0 (弱い力)
 グルーオン (強い力)
 グラビトン (重力)
 ヒッグス粒子

宇宙はニュートリノだらけ!

138億年前、宇宙が生まれた時にたくさん生まれたニュートリノが、今も私たちの周りを飛び回っています。

太陽や、夜空に光る星の中でも日々ニュートリノは生まれています。また、星の一生の最後の「超新星」と呼ばれる大爆発でもたくさん生まれます。

宇宙から飛んできた高速の粒子(宇宙線)が、地球の大気と衝突したときにもニュートリノが生まれます。

そのほかにも、地球の内部や、人間が作った原子炉、加速器などからもニュートリノは生まれています。

宇宙は、ニュートリノだらけといってもよいでしょう。現在、宇宙は平均的には1ccあたり300個くらいのニュートリノで満たされています。太陽に近い地球上では、その太陽で生まれたニュートリノが、私たちの体を1秒間で数百兆個も通り抜けています。



ニュートリノは何でも通り抜ける!

ニュートリノは、どんなものでも、なんの影響も与えずに簡単に通り抜けてしまいます。例えば、太陽で生まれたニュートリノは、地球500個分の厚さの壁があったとしても、半分以上は通り抜けます。こんな幽霊のようなニュートリノは、膨大に飛び回っているのに、人間の目はもちろん、普通の測定装置では見る(観測する)ことができません。

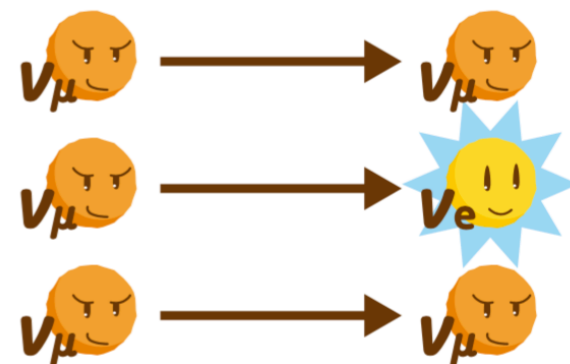


ニュートリノは軽い!

ニュートリノは捕まえるのが難しく、その性質は謎だらけです。いまでも、正確な重さは測られておらず、よく知られた物質の中でも特に軽い電子の100万分の1よりも軽いであろうということしかわかっていません。

ニュートリノは3兄弟!

ニュートリノの親戚ともいえる電子の仲間が3種類(電子、ミュー粒子、タウ粒子)あることと対応して、ニュートリノも電子型、ミュー型、タウ型の3種類あります。ニュートリノの反粒子、反ニュートリノにも同様の3種類があります。



ニュートリノは変身する!

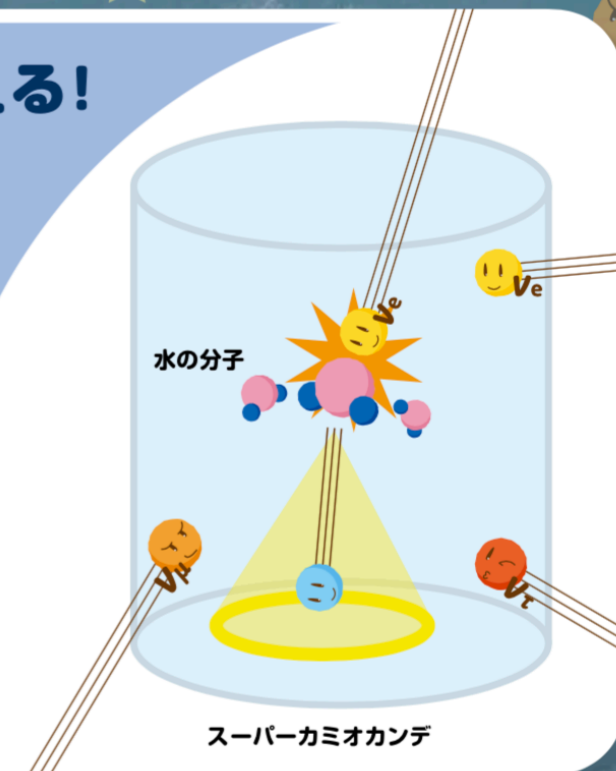
ニュートリノは、誰にも見られていない間に、こっそり自分の種類を変えてしまうという、不思議な性質を持っています。例えば、生まれた時はミュー型に違いなかったのに、遠くまで旅しているうちに電子型になってしまうことがあるのです。

ニュートリノがあちらの型とこちらの型との間を揺れ動いているようにふるまう様子から、この現象は「ニュートリノ振動」と呼ばれます。

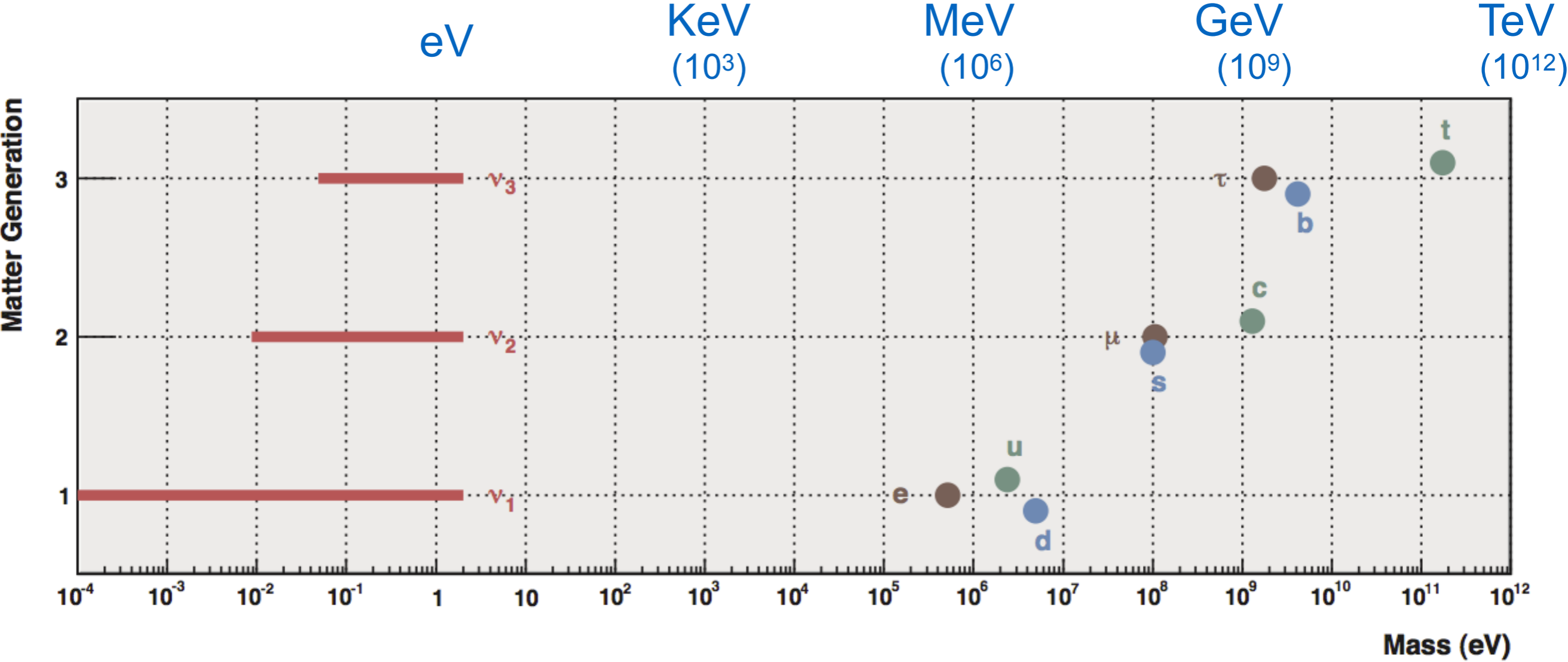
この不思議な現象は、ニュートリノに重さがある場合(正確には質量に違いがある場合)にしか起こりません。

ニュートリノをつかまえる!

なんでも簡単に通り抜けるニュートリノですが、ごくごくまれに、通り道にある物質に衝突して、観測しやすい粒子を叩き出すことがあります。スーパーカミオカンデでは、5万トンという大量の水をたくさんの光センサーで監視していて、水の分子にニュートリノが衝突して飛び出た粒子が放つ弱い光を捕まえます。現在、スーパーカミオカンデでは1日あたり太陽からのニュートリノを約15個、大気中でできたニュートリノを約8個見つけています。また、東海村の加速器で作った、ミュー型ニュートリノが変化した電子型ニュートリノを捕まえています。スーパーカミオカンデは、見つけたニュートリノの種類や飛んできた方向、速さ(エネルギー)などを見極めることができます。



素粒子の質量スケール

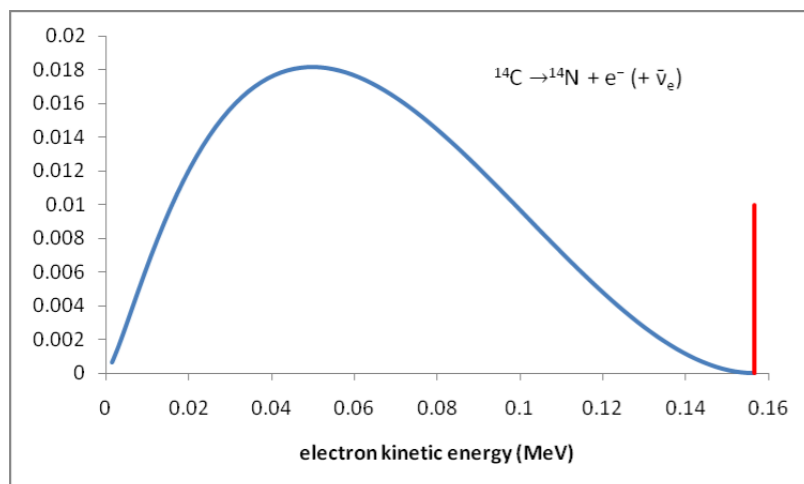
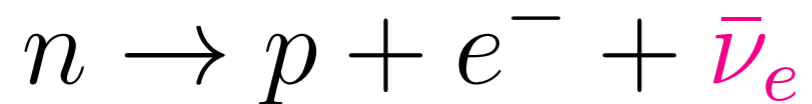


ニュートリノ仮説 (1930)

Total energy does not conserved in beta decay:



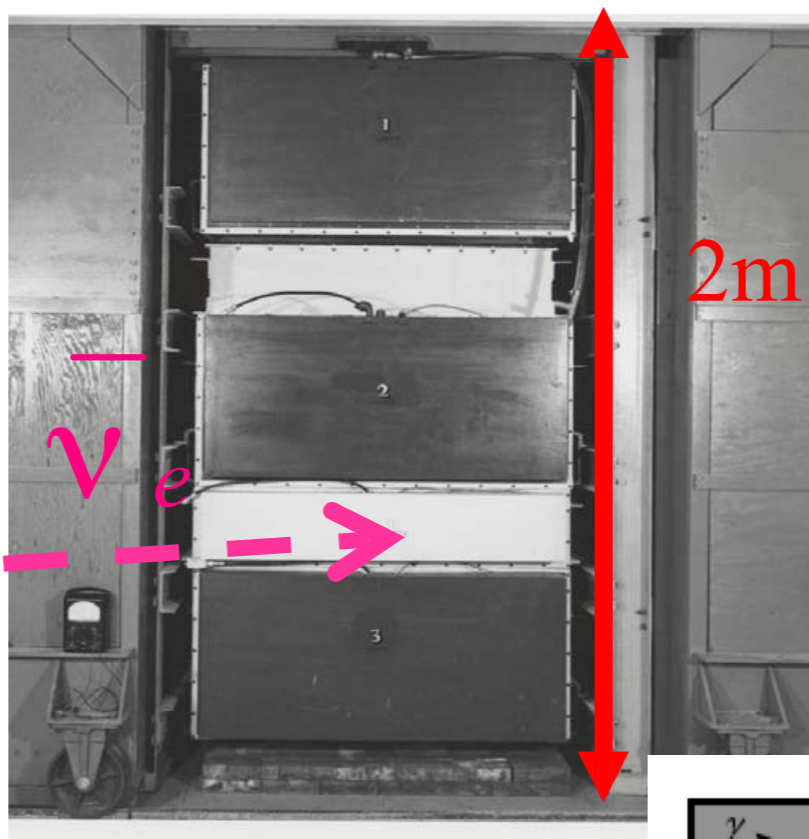
Hypothesis of existing neutral particle was proposed by Pauli:



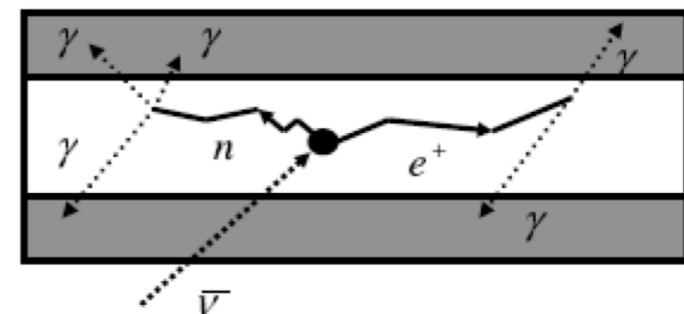
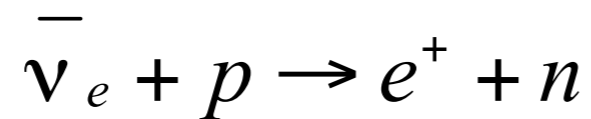
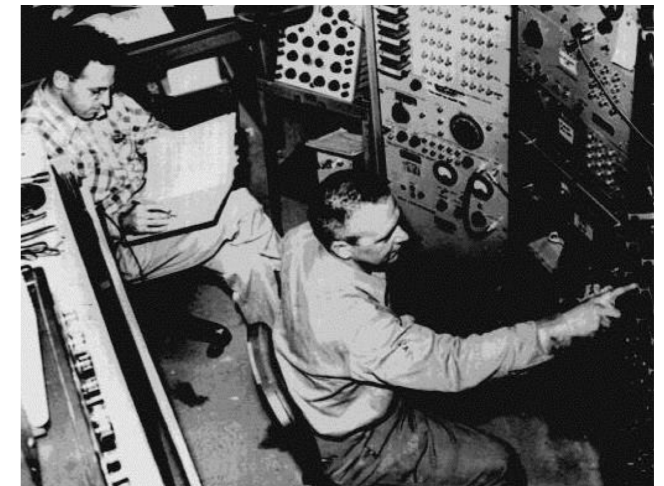
W. Pauli (1900-1958)

仮説から発見へ (1950's)

- Detect signal of reactor neutrino by inverse beta reaction
- two-fold coincidence of prompt positron and delayed neutron



F. Reines & C. Cowen

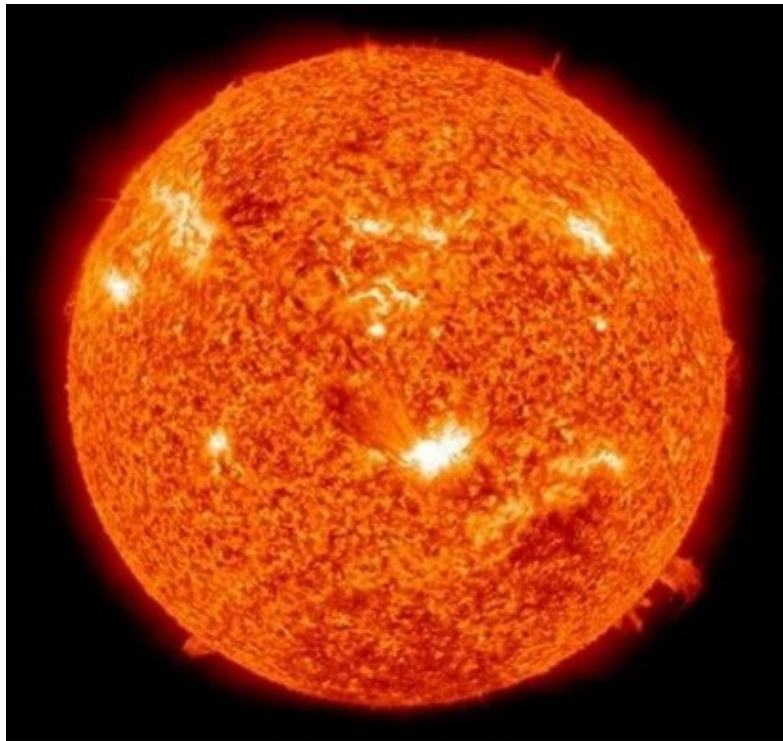


Scintillator

H₂O + CdCl₂

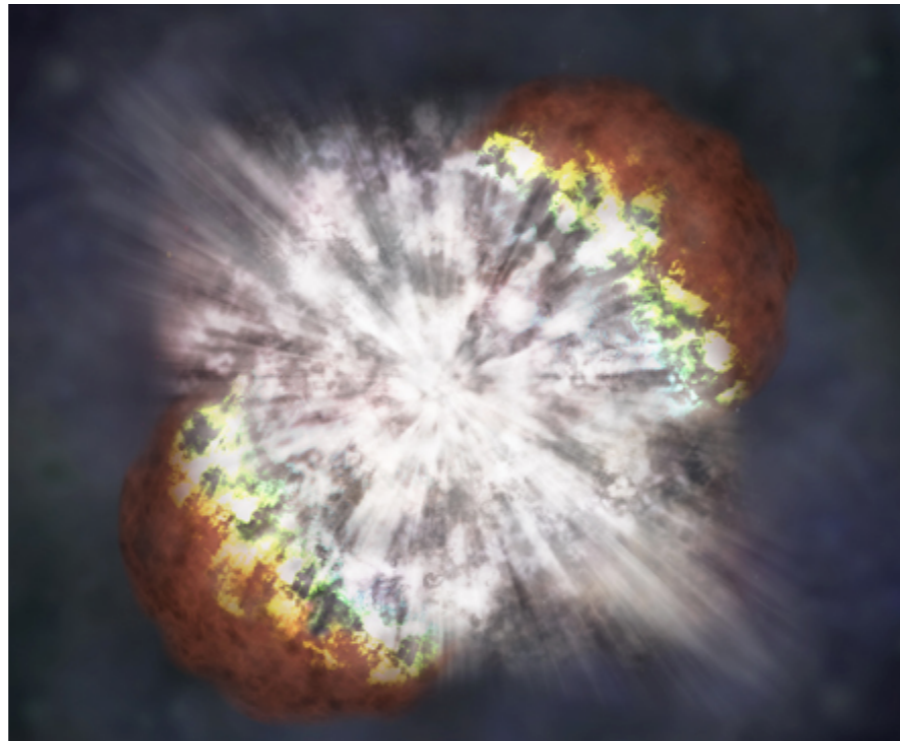
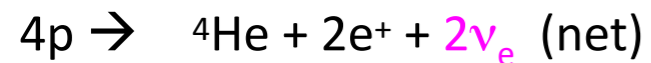
Scintillator

様々なニュートリノ源



太陽ニュートリノ

太陽中心での核融合により生成



超新星ニュートリノ

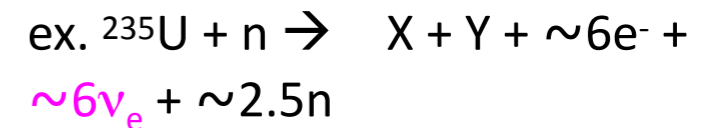
星の重力収縮によって生成され、
爆発時に一斉に放出

超新星1987Aで初めて検出

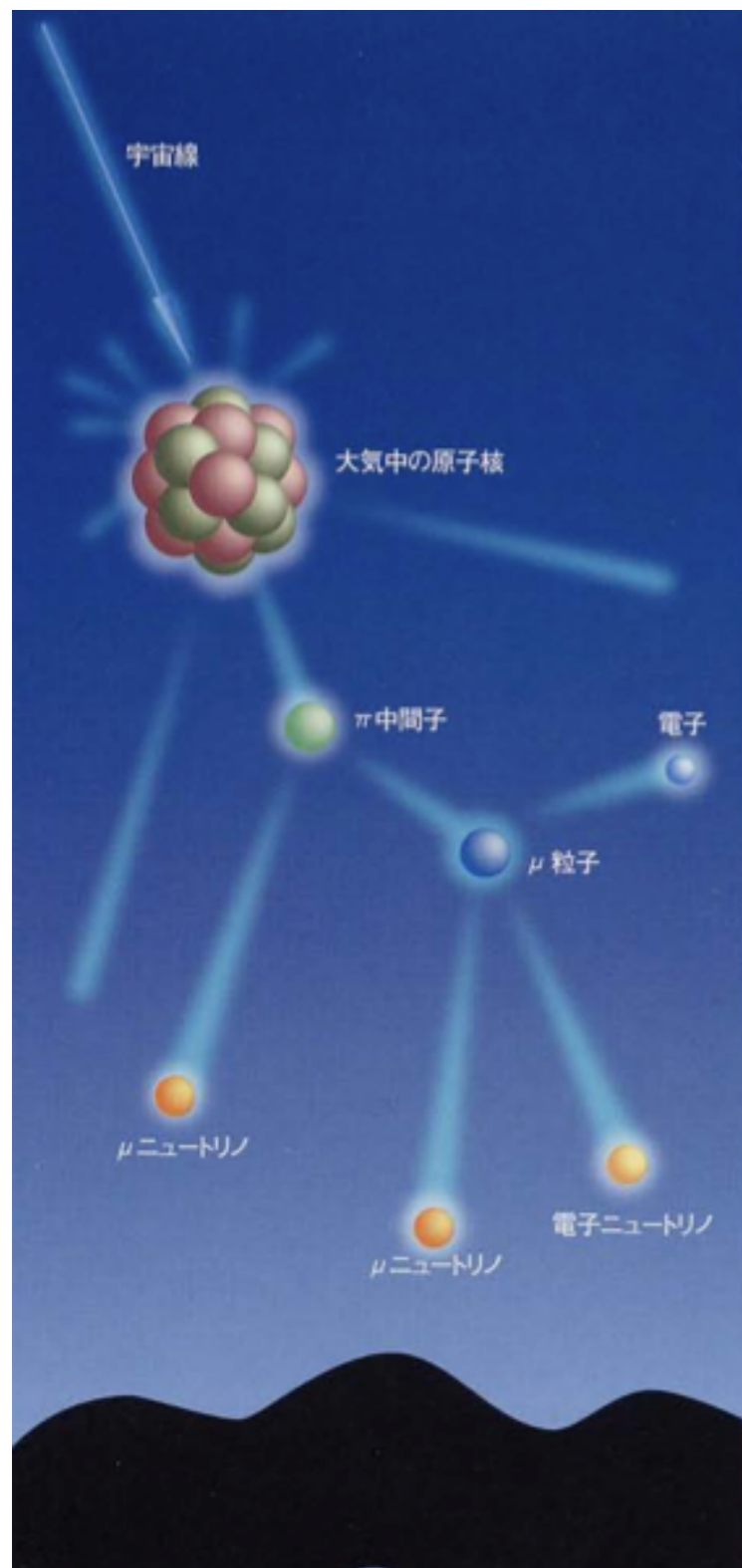


原子炉ニュートリノ

ウラン・プルトニウムの核分裂に
よって生成



様々なニュートリノ源

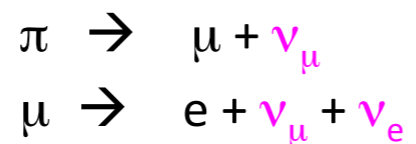


天体ニュートリノ



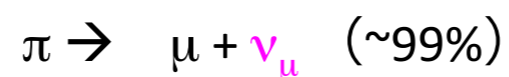
大気ニュートリノ

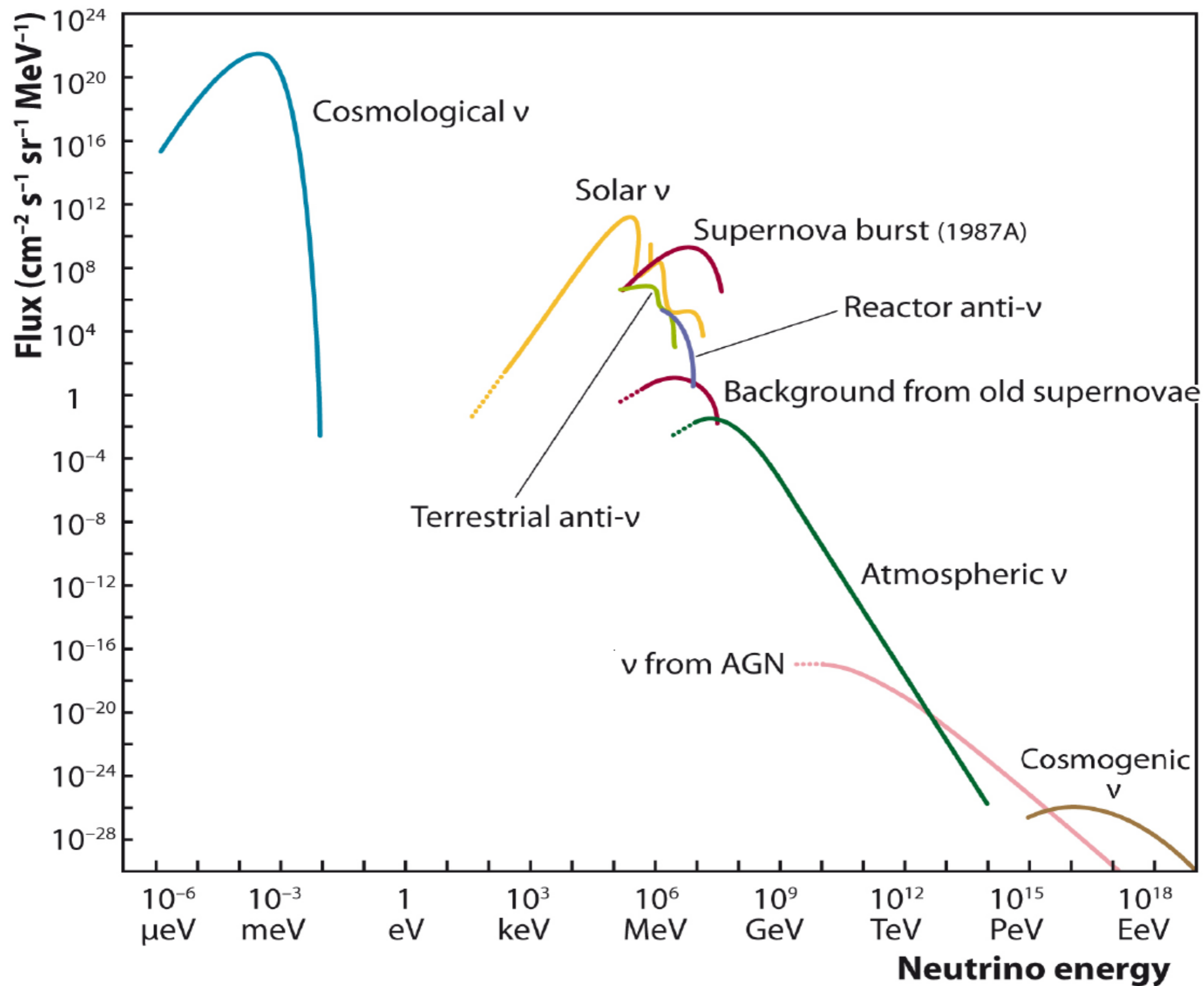
宇宙線と大気の衝突で生成された中間子の崩壊から生成されたニュートリノ



加速器ニュートリノ

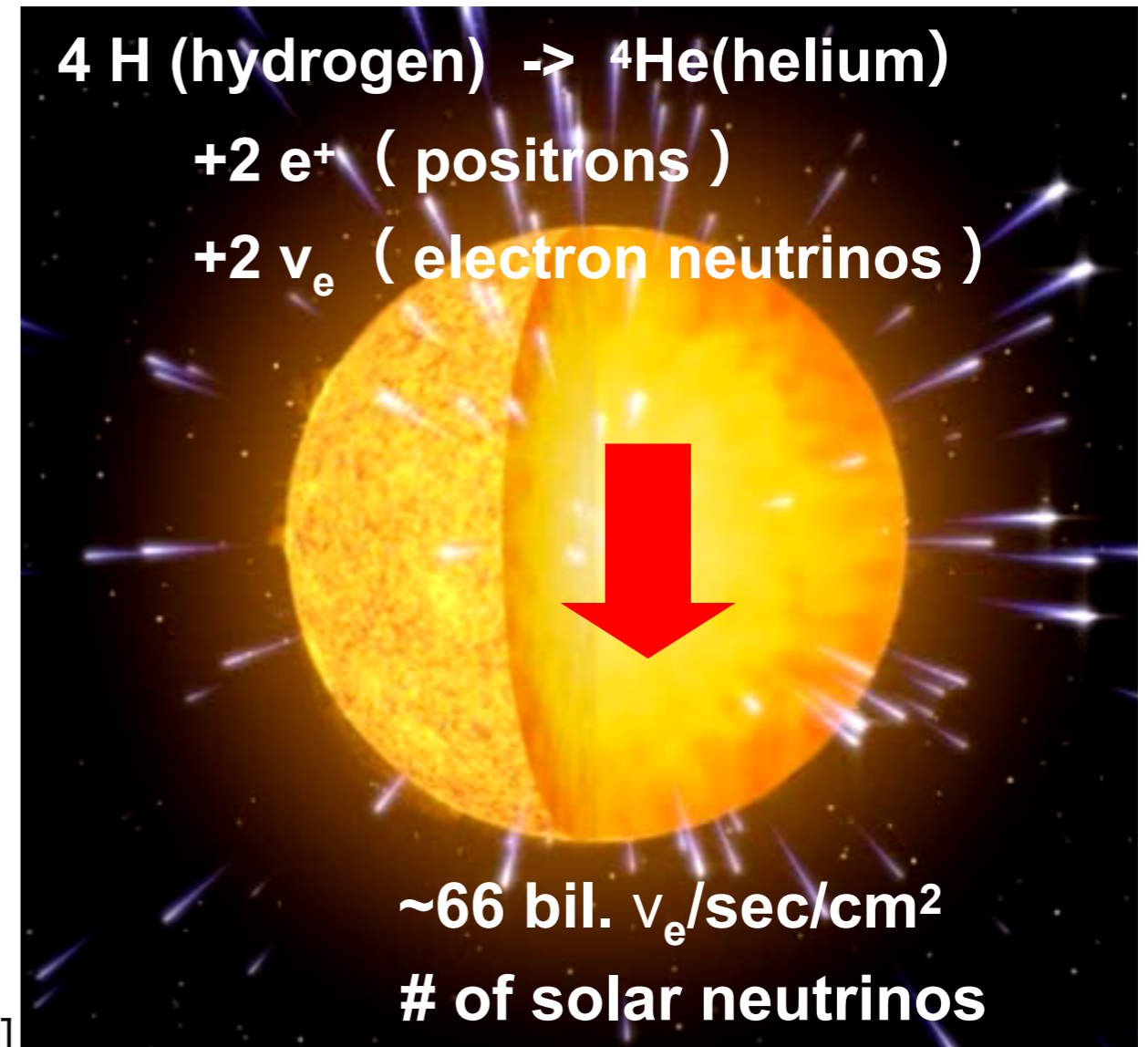
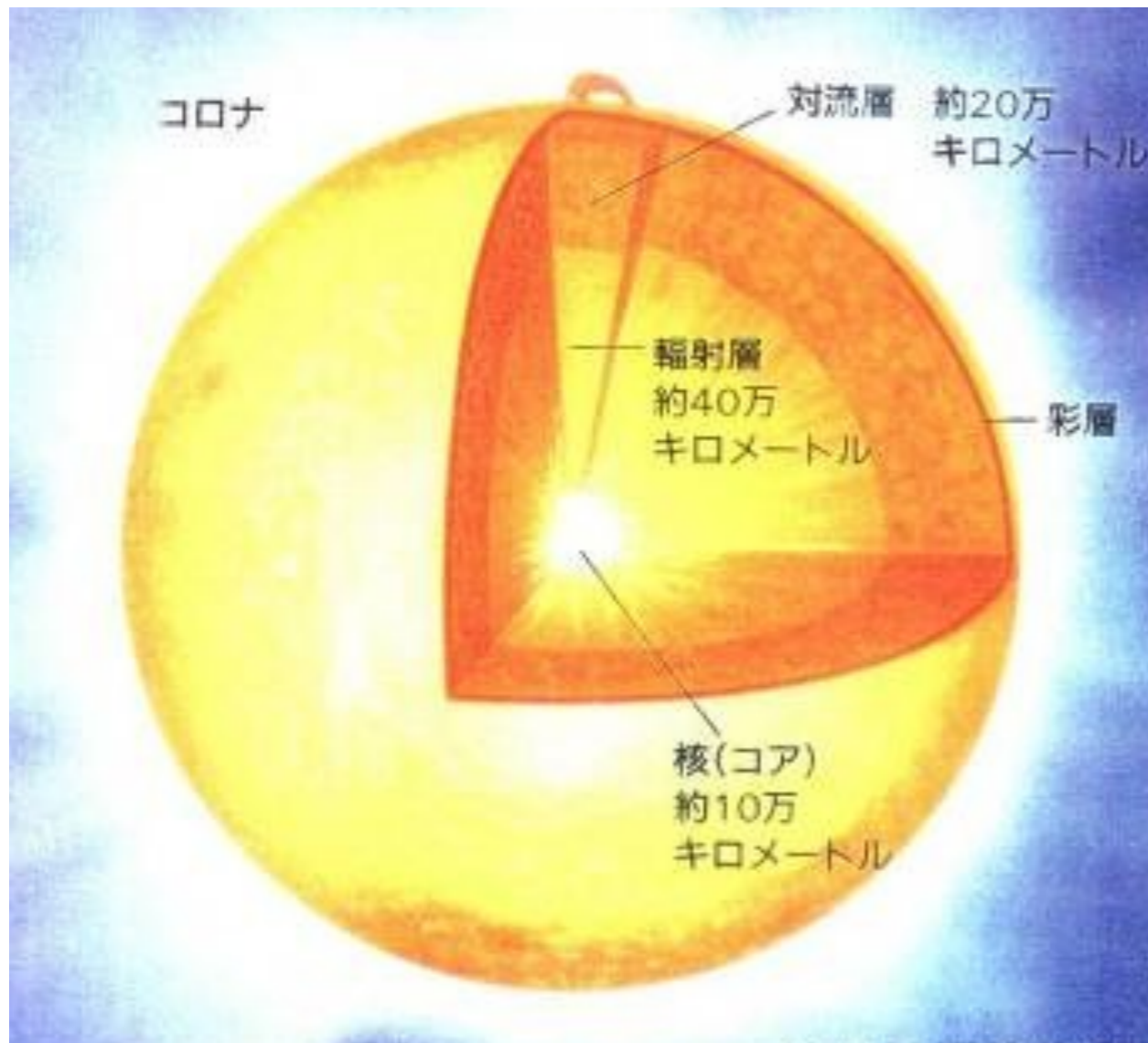
加速された陽子を物質に当ててパイ中間子から崩壊させて生成





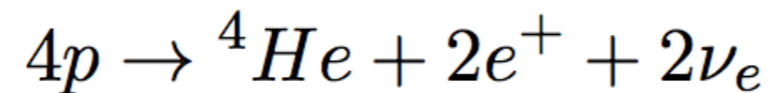
太陽ニュートリノ

- 中心での高温・高圧環境下での核融合によるエネルギー生成
- その核融合反応で電子ニュートリノが発生する

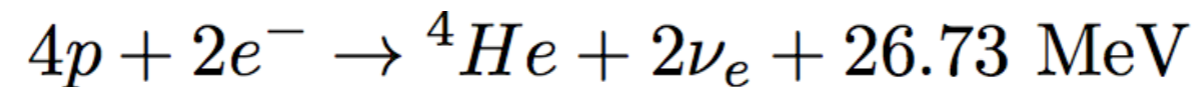


First estimation of solar nu. flux

- In main reaction, four protons are fused into one Helium. As a result, two positrons and two electron neutrinos are produced:



- Energy of 26.73 MeV is produced during this process. (i.e. ~13MeV per one neutrino)

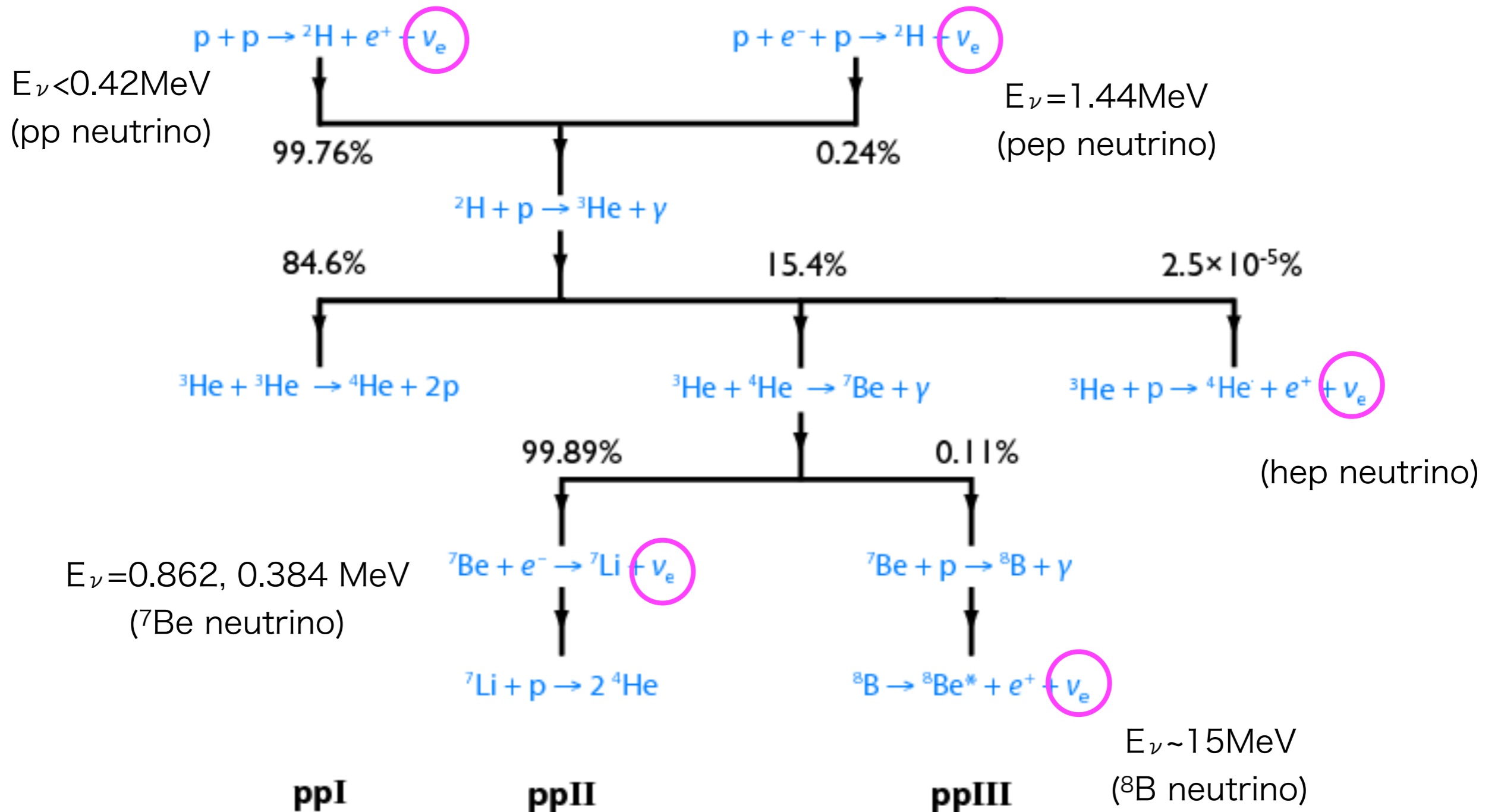


$$Q = 2m_e + 4m_p - m_{\text{He}} = 26.73 \text{ MeV}$$

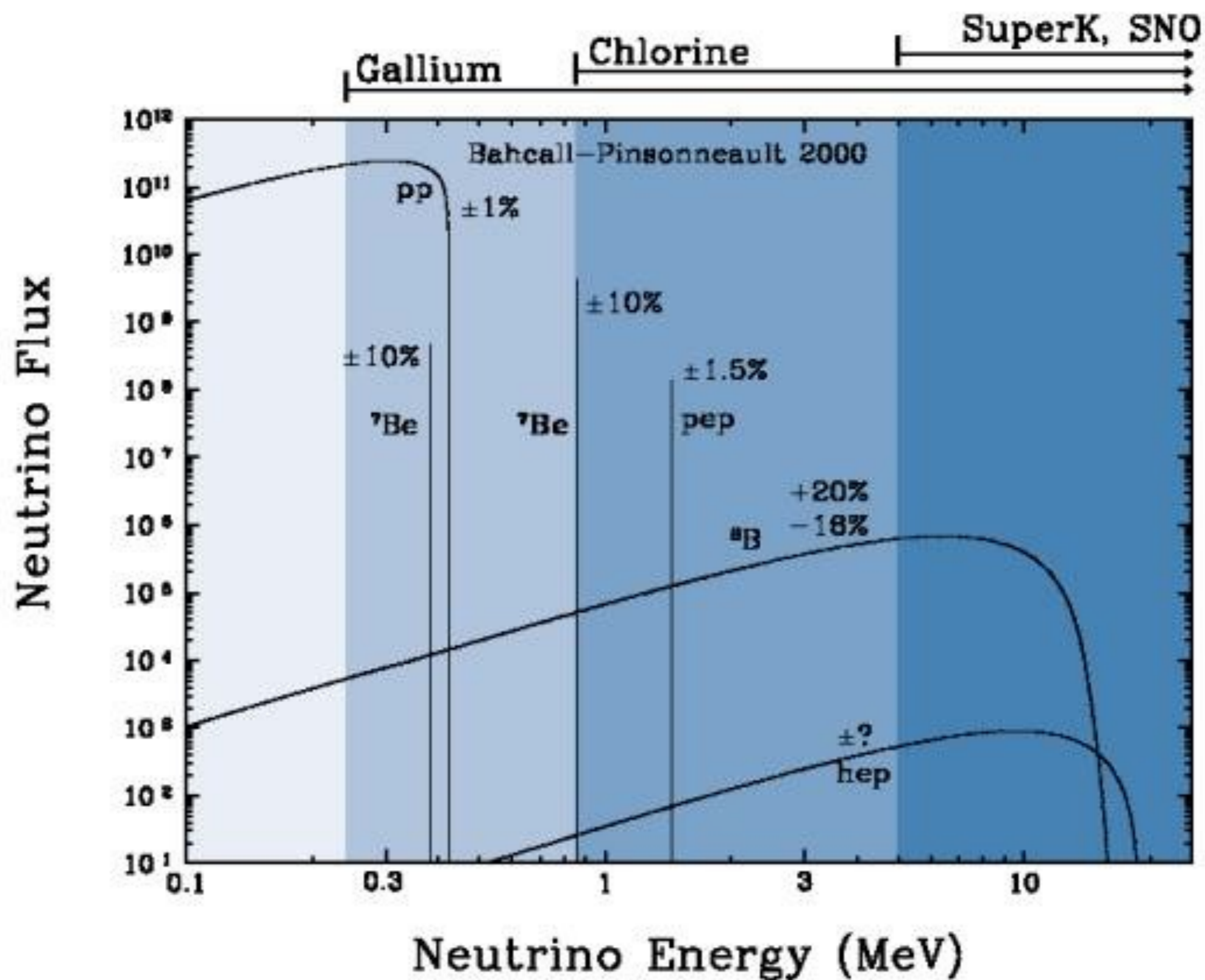
- This energy is used for radiation of Sun. Considering solar constant ($S \sim 8.5 \times 10^{11} \text{ MeV/cm}^2/\text{sec}$), solar neutrino flux on Earth is estimated:

$$\Phi_\nu \sim \frac{S}{13 \text{ MeV per } \nu_e} = 6.5 \times 10^{10} / \text{cm}^2 / \text{sec}$$

P-P chain



太陽ニュートリノスペクトル

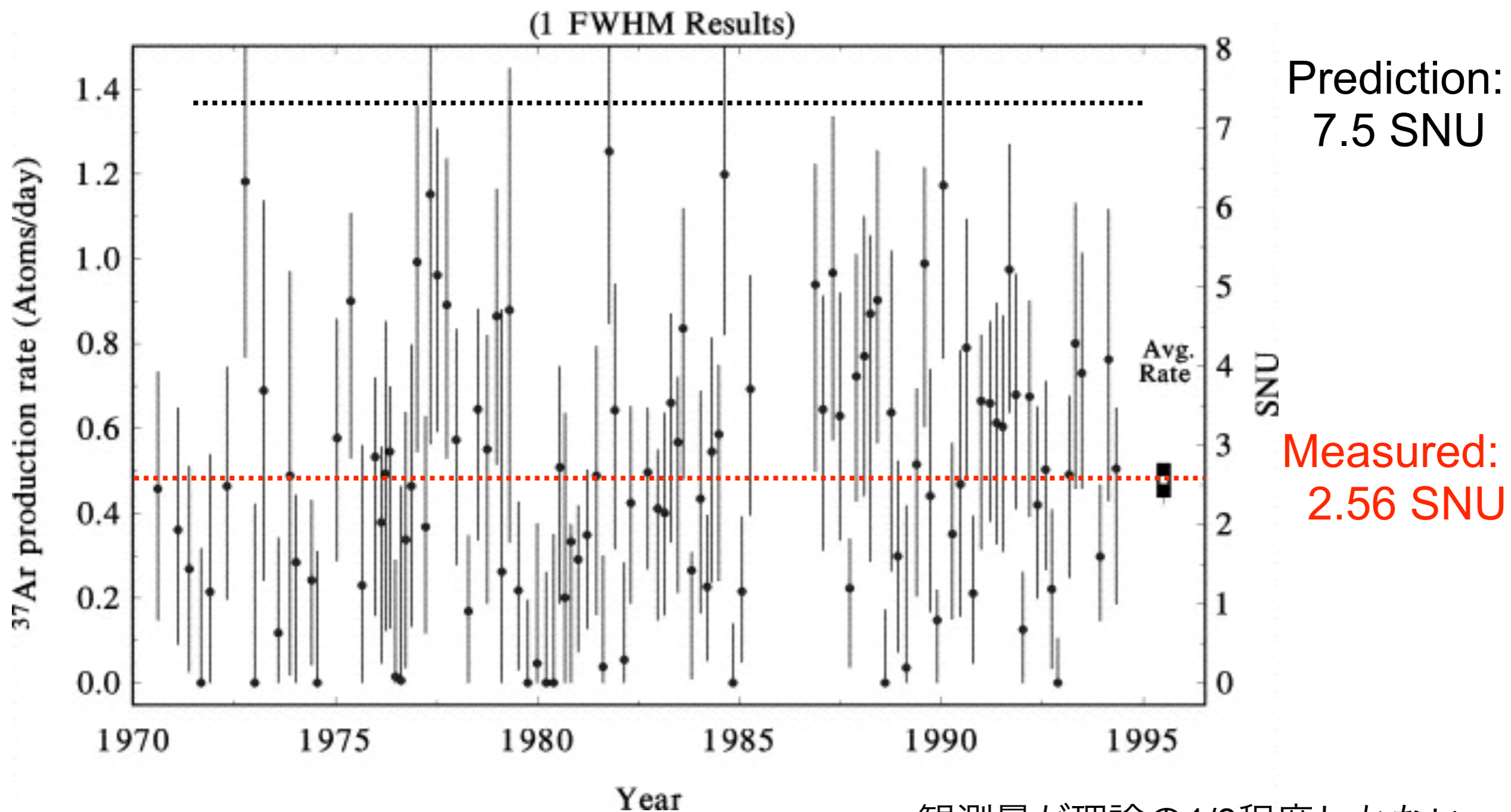


最初の実験 (Chlorine experiment)

- Radiochemical
- Experiment
 - Homestake mine, South Dakota (4100 m.w.e.)
 - 615ton C_2Cl_4 target
 - natural abundance of ^{37}Cl : 24%
- Reaction:
$$^{37}Cl + \nu_e \rightarrow ^{37}Ar + e^-$$
 - threshold energy: 814 keV
 - collect Ar by He bubbling and charcoal trapping
- Decay:
$$^{37}Ar \rightarrow ^{37}Cl + e^- + \bar{\nu}_e$$
 - half-time 35 days
 - emit 2.82 keV Xray or Auger electron



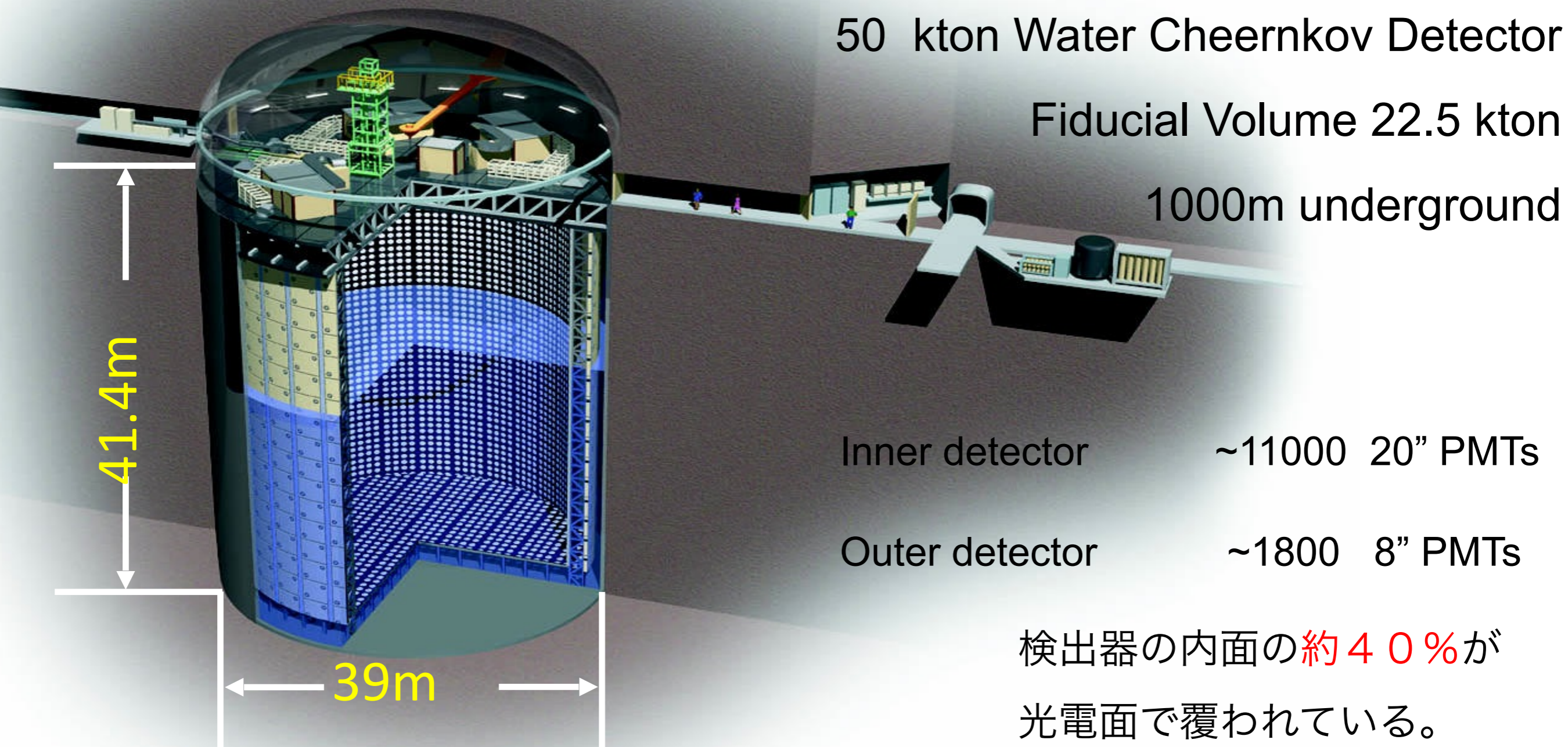
Chlorine Result



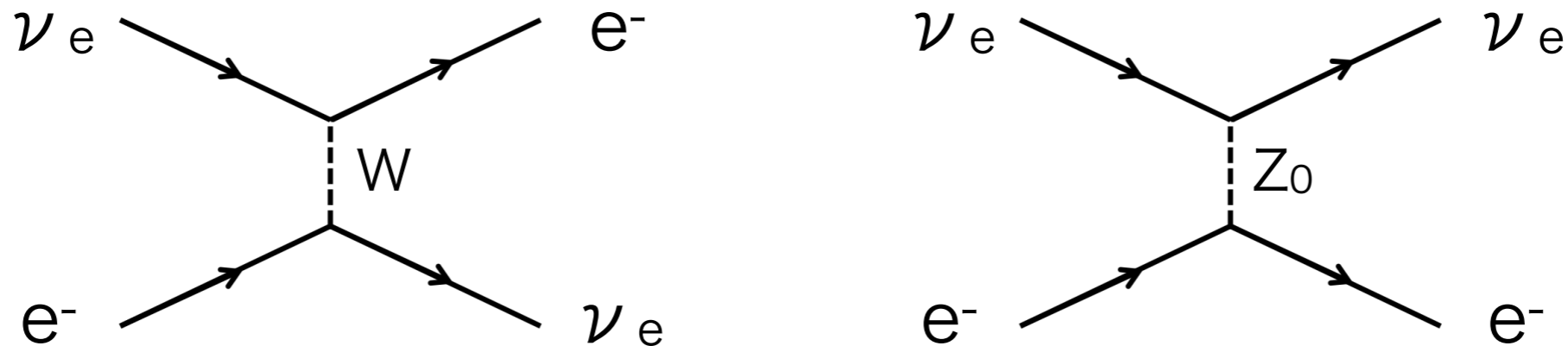
観測量が理論の1/3程度しかない

→ 太陽ニュートリノ問題

Super-Kamiokande (1996-)



Neutrino-Electron Scattering



- ES process occurs via both CC and NC
large cross section, but cannot distinguish CC and NC
- Electron direction keeps neutrino's direction
- Super-K's Threshold energy: 5MeV
due to smaller Cherenkov photons
sensitive to ^8B and hep neutrino

SKでの太陽ニュートリノ測定

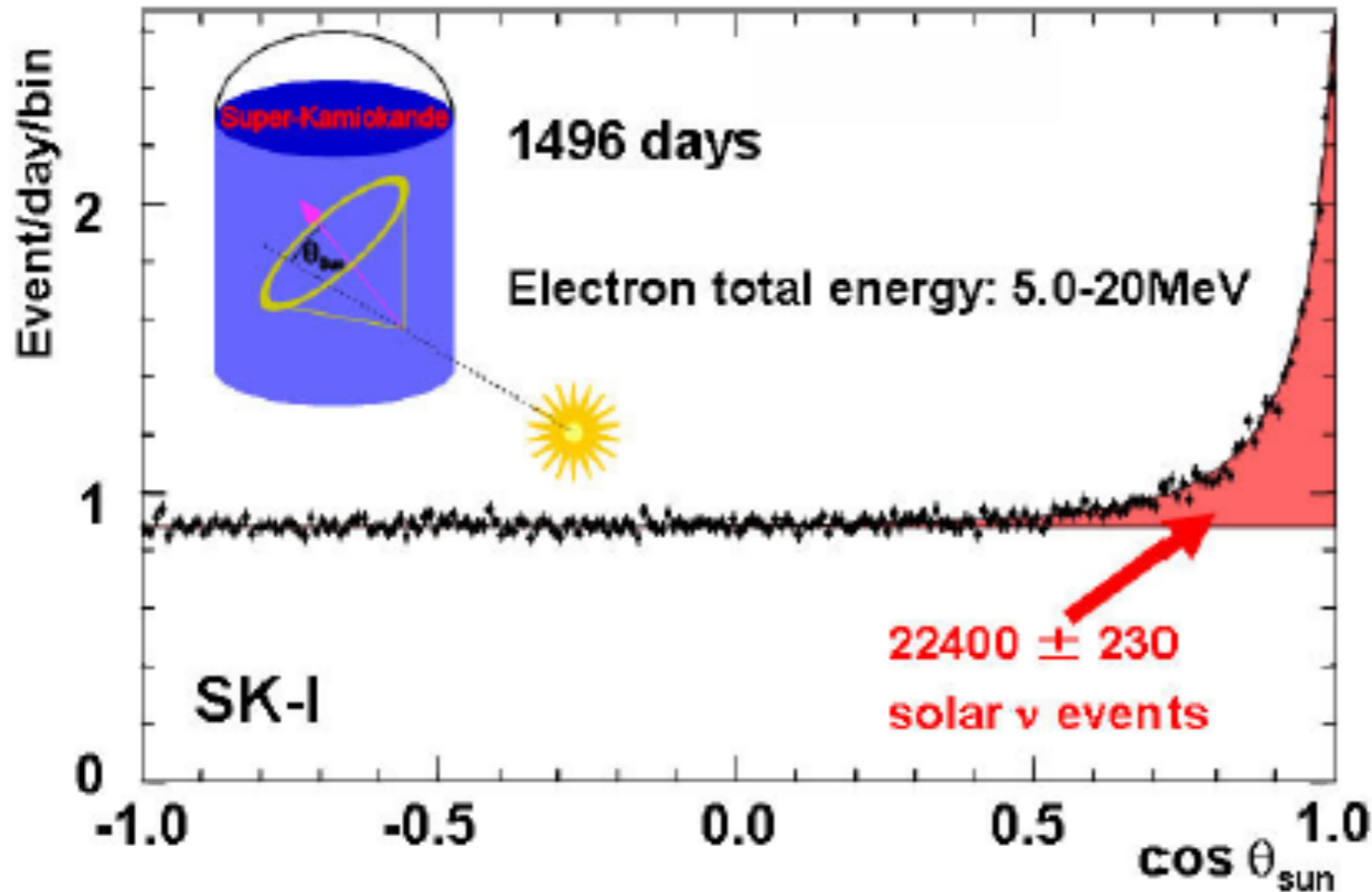
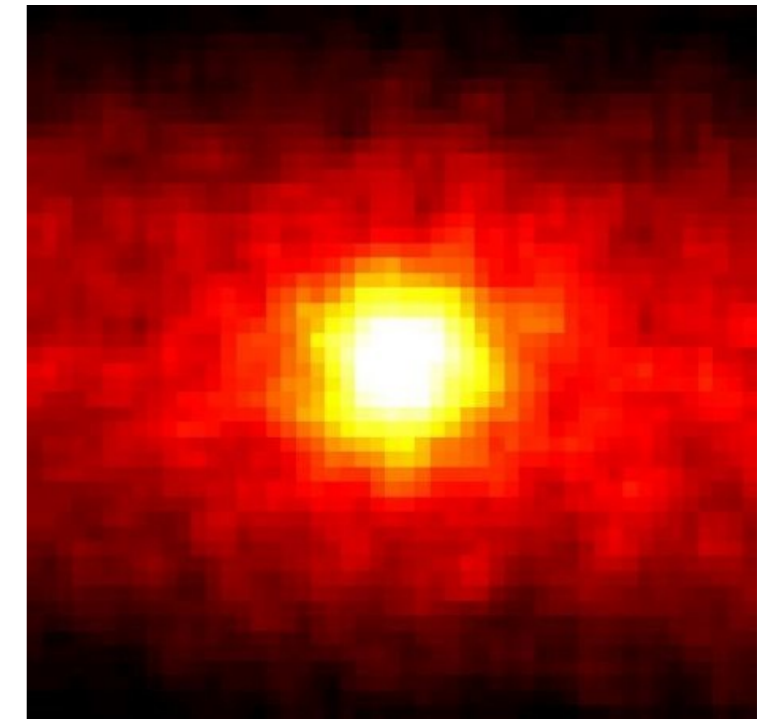


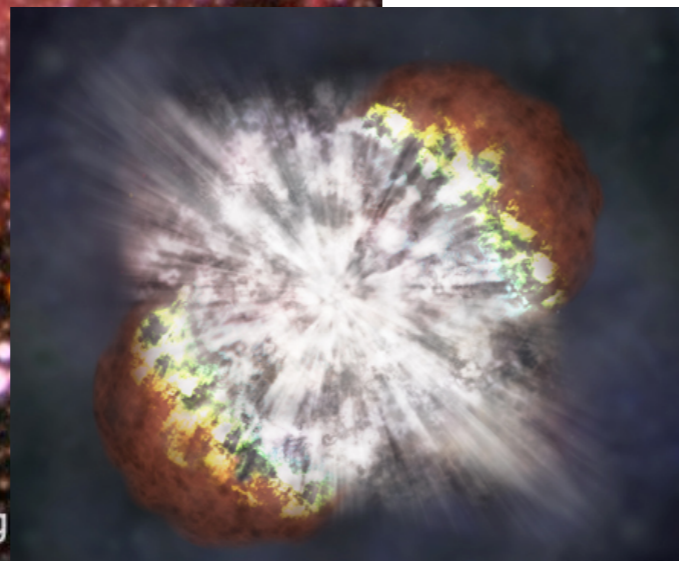
Image of Sun by neutrino



$$\frac{\Phi(^8B)_{meas.}}{\Phi(^8B)_{SSM}} = 46.5\%$$

同様に理論値よりも少ない

超新星爆発 (SuperNova) ニュートリノ



- Most spectacular events in astronomy
Explosion of massive stars
- Estimated 1~2 SN / 100 year in a galaxy
- Extremely huge amount of neutrinos are emitted in ~10 seconds
- Nucleosynthesis of heavy elements during SN burst
r-process by neutron-rich environment

爆発で放出されるエネルギー

放出されるエネルギーのスケール

- 放射エネルギー: $E_{\text{rad}} \sim 10^{49}$ erg
 - 光度: $10^{41} \sim 10^{42}$ erg/s
- 爆発エネルギー: $E_{\text{kin}} \sim 10^{51}$ erg
 - 物質放出の運動エネルギー
- ニュートリノエネルギー: $E_{\nu} \sim 10^{53}$ erg
 - SN1987Aニュートリノ検出データ

太陽が45億年燃える間に放出するエネルギー: $\sim 10^{51}$ erg

- 太陽の放射光度: 4×10^{33} erg/s

原子力発電所の年間発電量: $\sim 10^{23}$ erg

- 原子炉1基の出力: $\sim 10^6$ kW = 10^9 J/s = 10^{16} erg/s

Neutrino has 99% of SN energy

爆発までのメカニズム

重力崩壊型超新星爆発

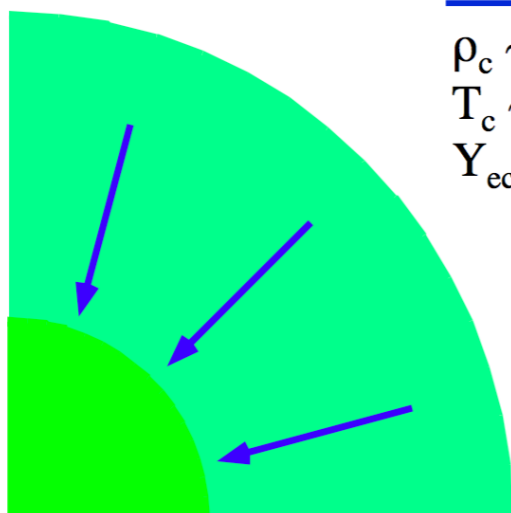
$\sim 20M_{\text{sun}}$

鉄のコア

重力崩壊

$\rho_c \sim 10^{10} \text{ g/cm}^3$
 $T_c \sim 1 \text{ MeV}$
 $Y_{\text{ec}} \sim 0.42$

電子捕獲
反応

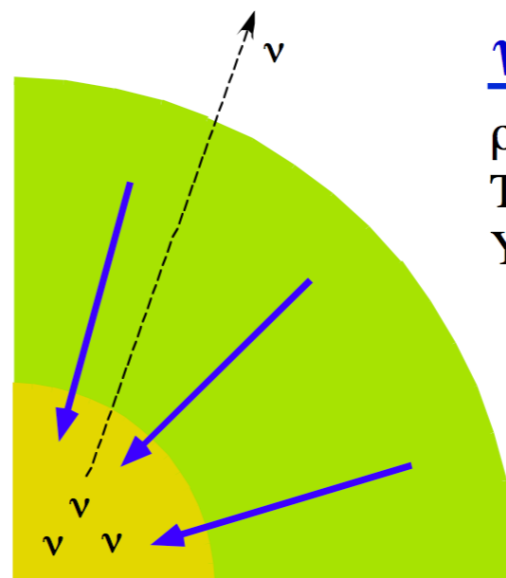


1000 km

ν 反応

ν -閉込め

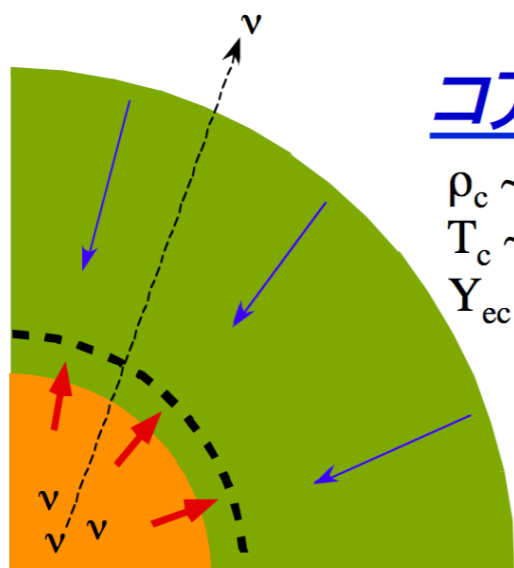
$\rho_c \sim 10^{12} \text{ g/cm}^3$
 $T_c \sim 2 \text{ MeV}$
 $Y_{\text{ec}} \sim 0.34$



コアバウンス

$\rho_c \sim 3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$
 $T_c \sim 5 \text{ MeV}$
 $Y_{\text{ec}} \sim 0.31$

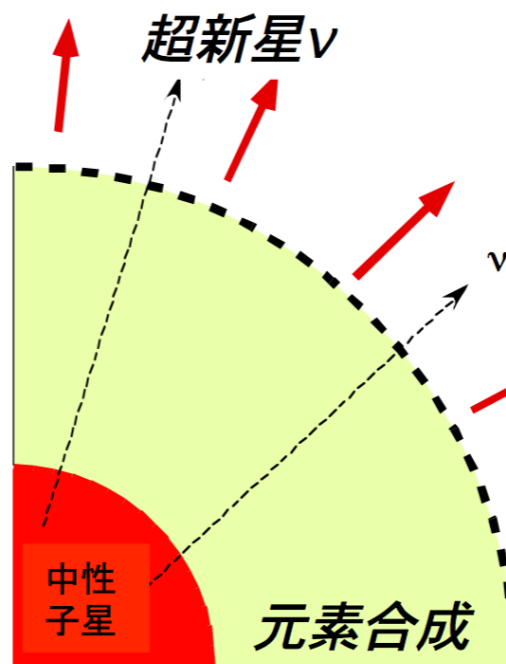
衝撃波



超新星 ν

爆発

$\rho_c \sim 4 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$
 $T_c \sim 10 \text{ MeV}$
 $Y_{\text{ec}} \sim 0.31$



中性子星

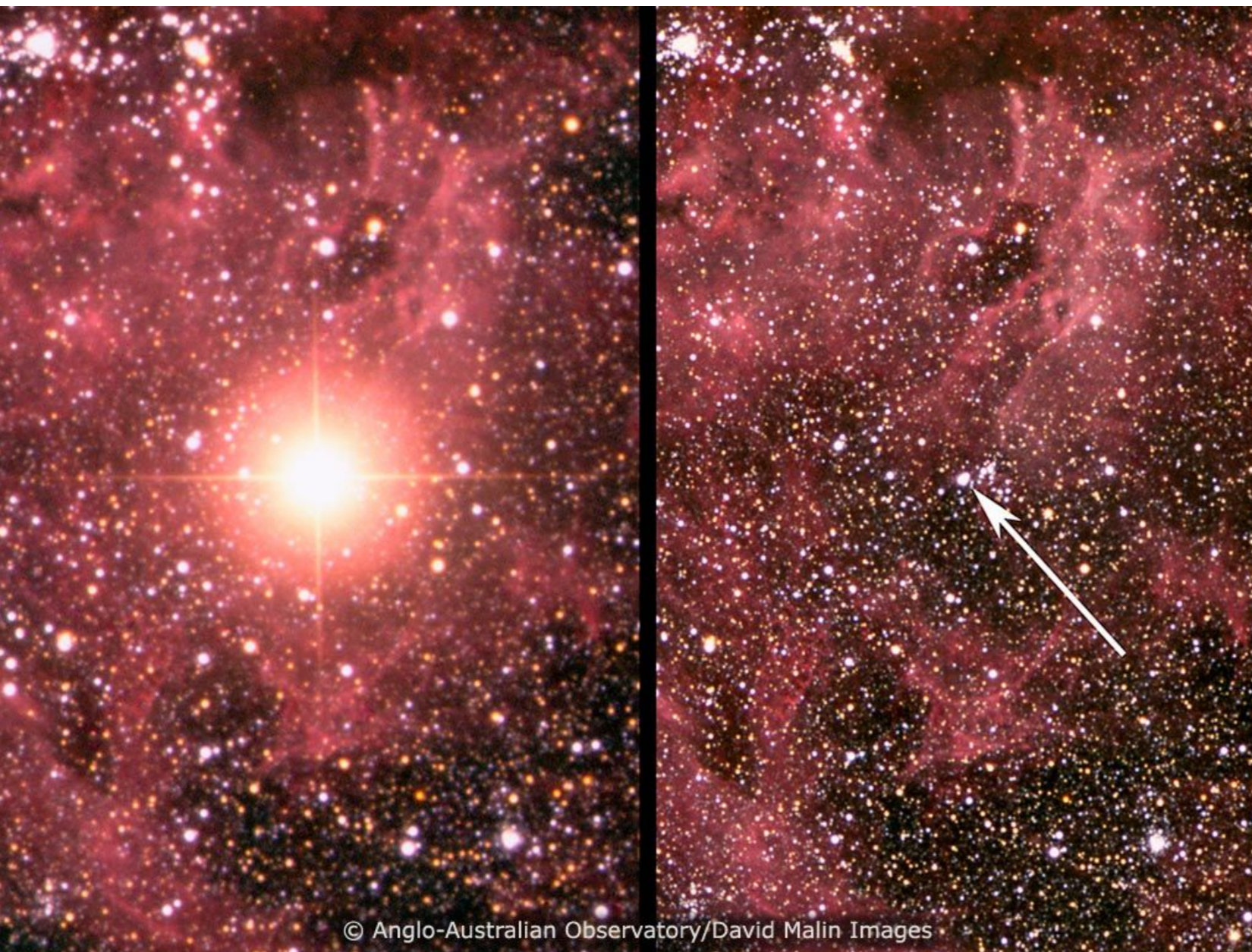
元素合成

$\sim 10 \text{ km}$

中性子星

$T \sim 0 \text{ MeV}, Y_e < 0.1$

SN1987A



© Anglo-Australian Observatory/David Malin Images

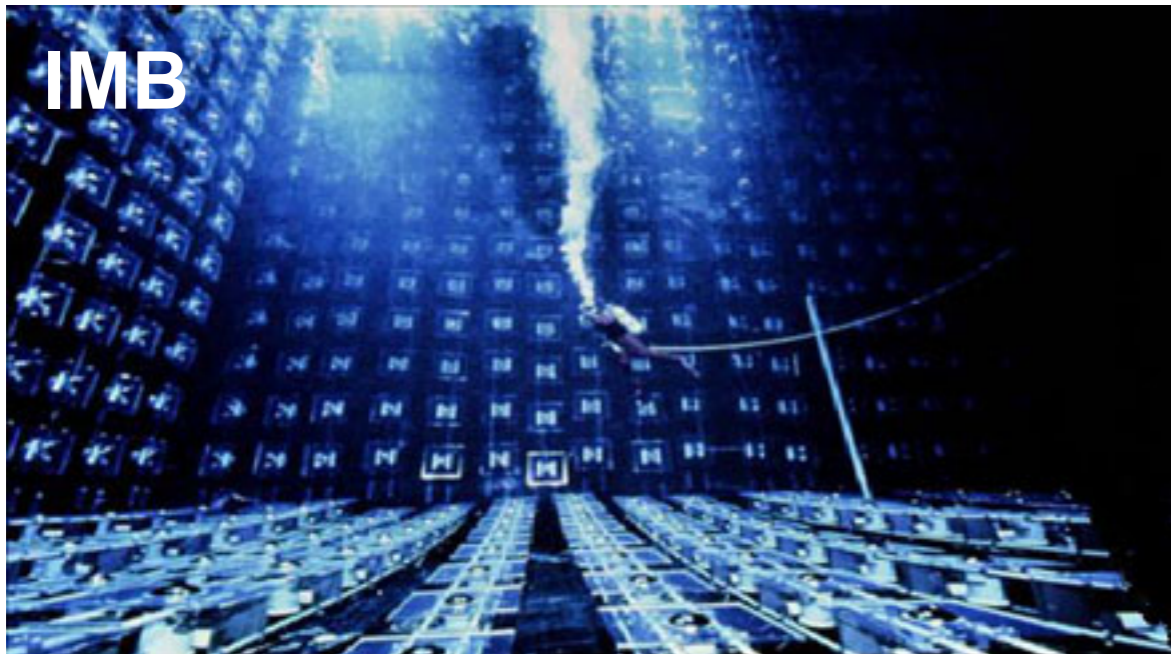
- Brightest SN since Kepler's SN1604
 - Observed in all wavelength
 - First detected by neutrino
- Explosion: Feb. 23rd, 1987
150k ly (~50kpc) in LMC
Type-II SN
- Progenitor
Sanduleak -69 202
blue B3I supergiant (~20M_{sun})

SN1987Aからのニュートリノ検出

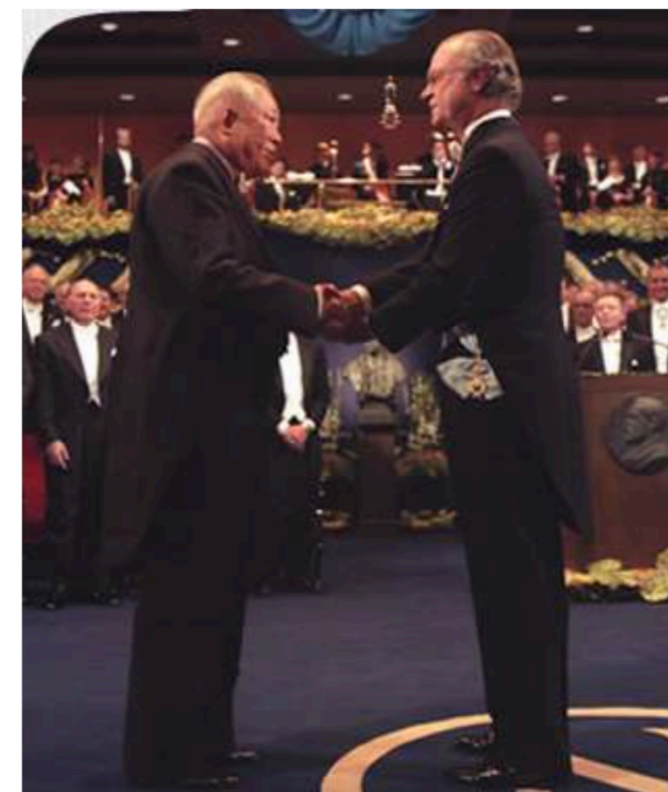
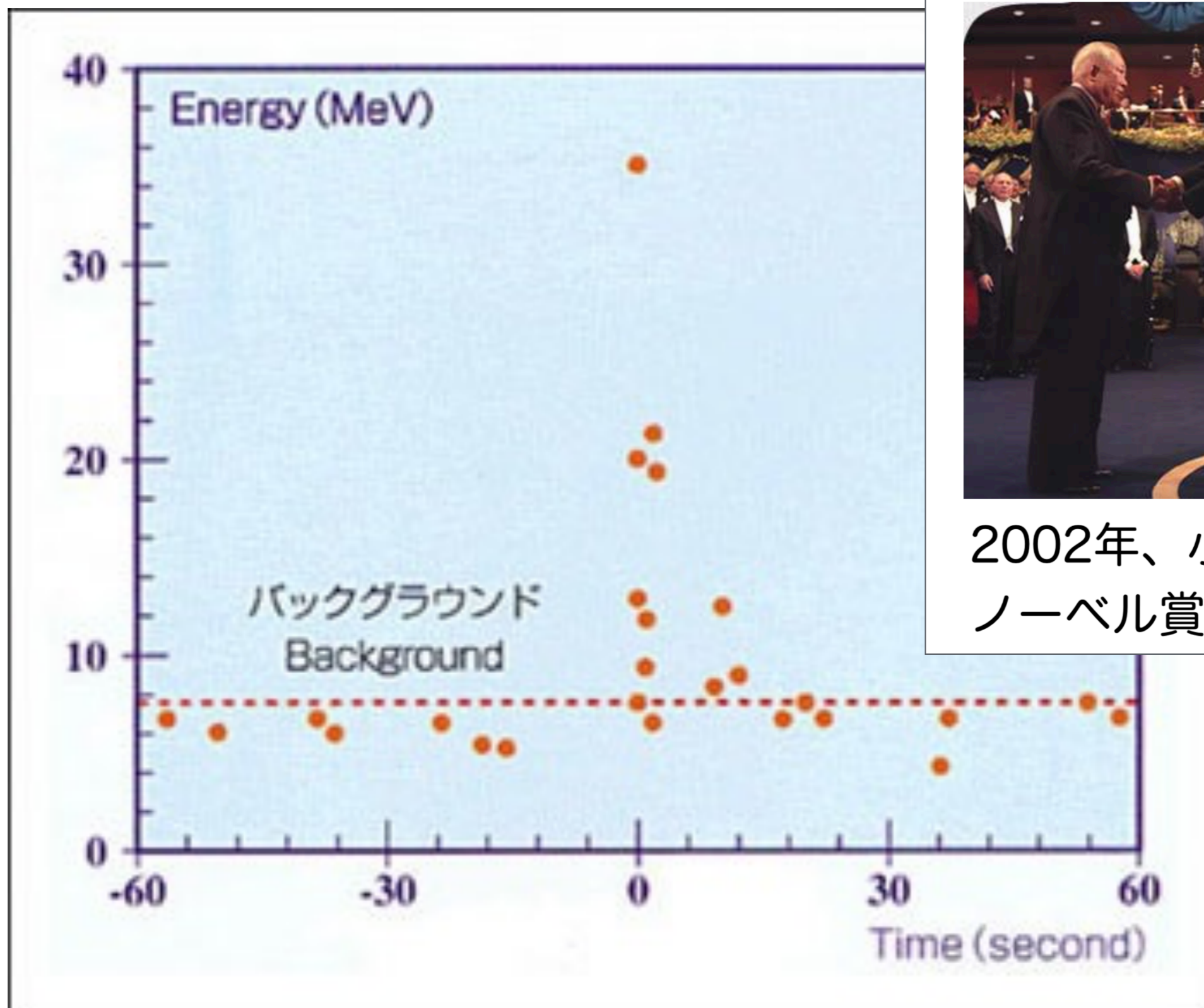
Water Cherenkov:



Scintillator:

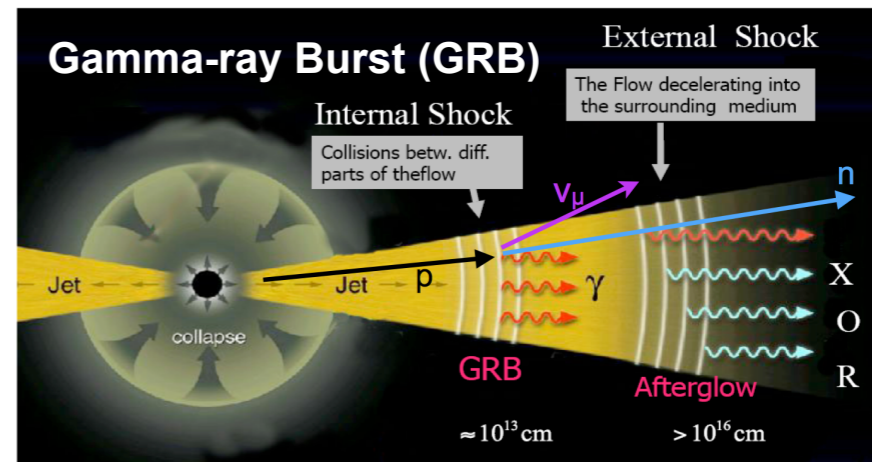
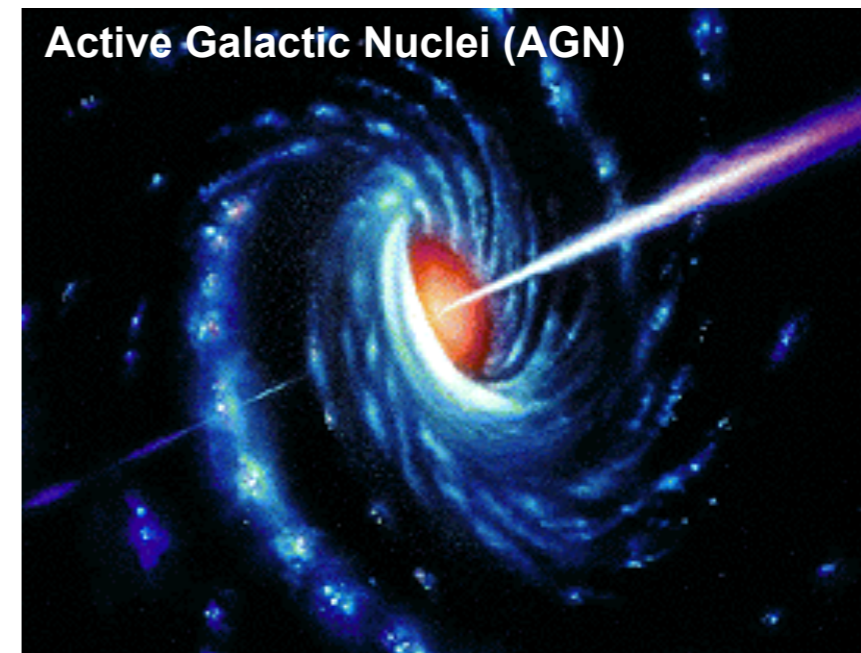
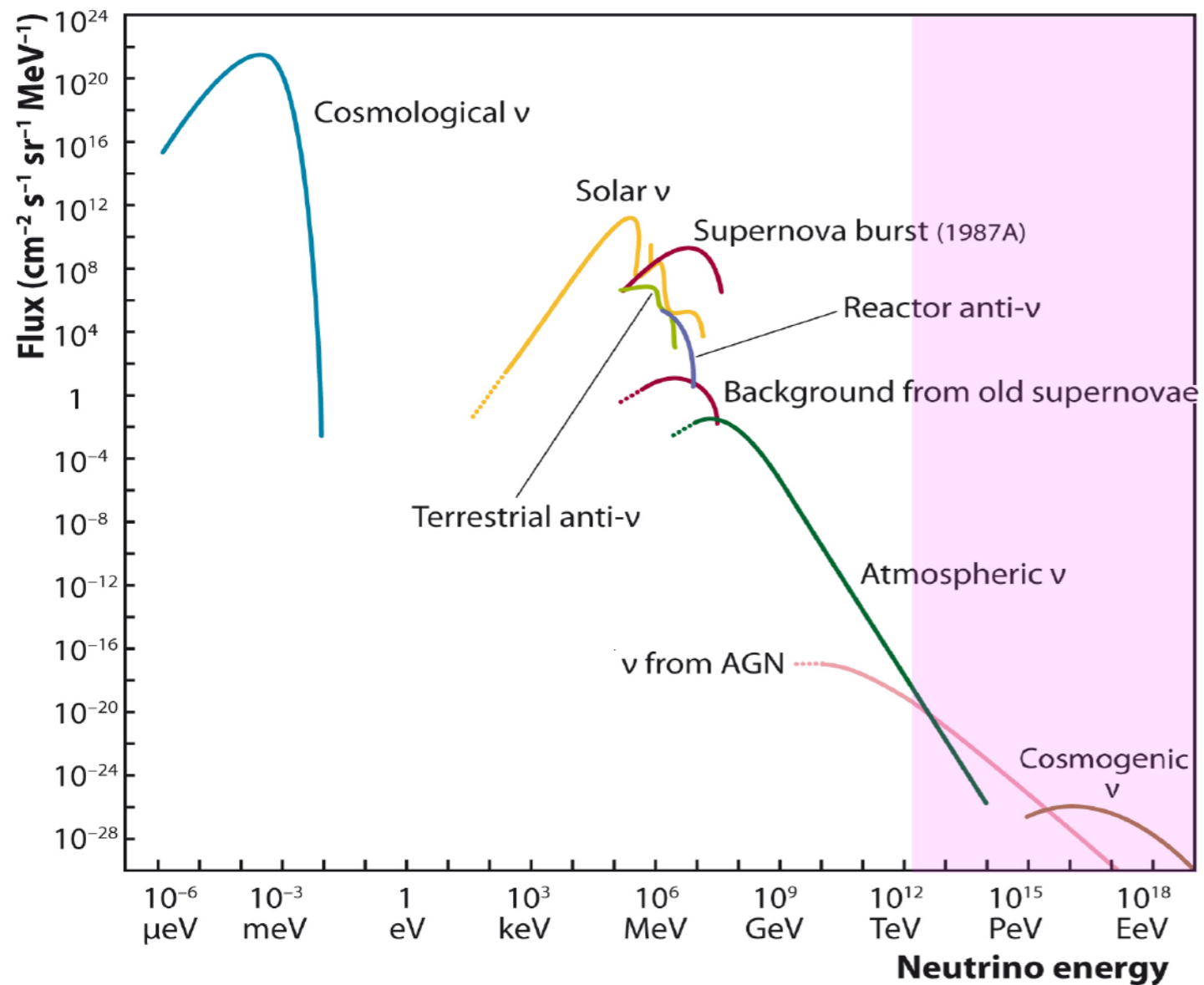


カミオカンデで観測された 超新星1987Aからのニュートリノ信号



2002年、小柴先生
ノーベル賞受賞

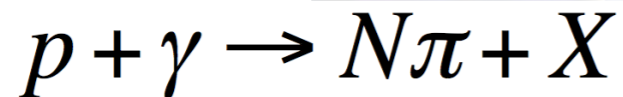
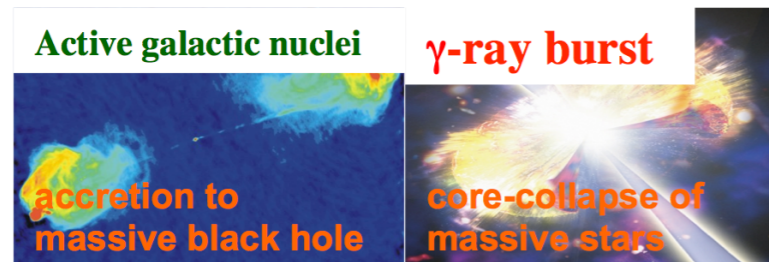
天体ニュートリノ



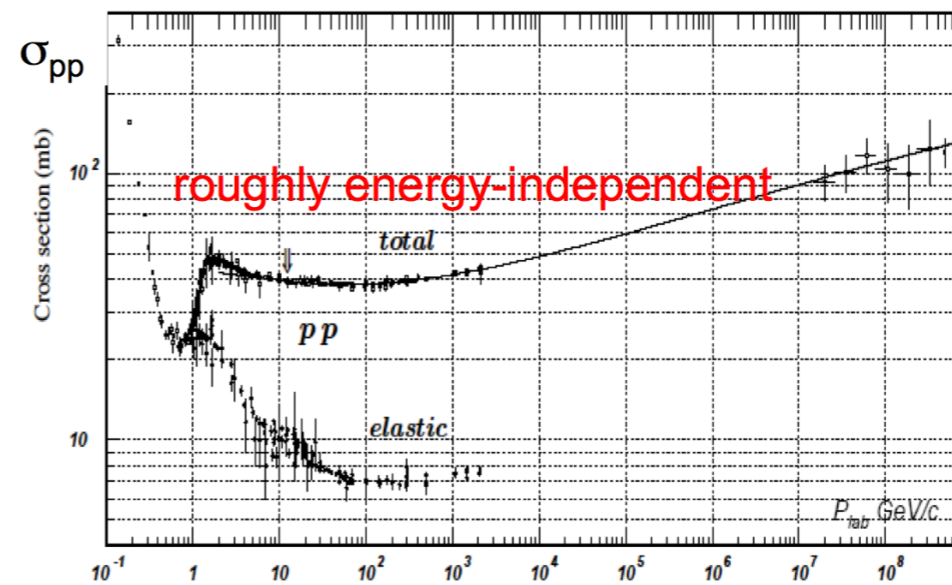
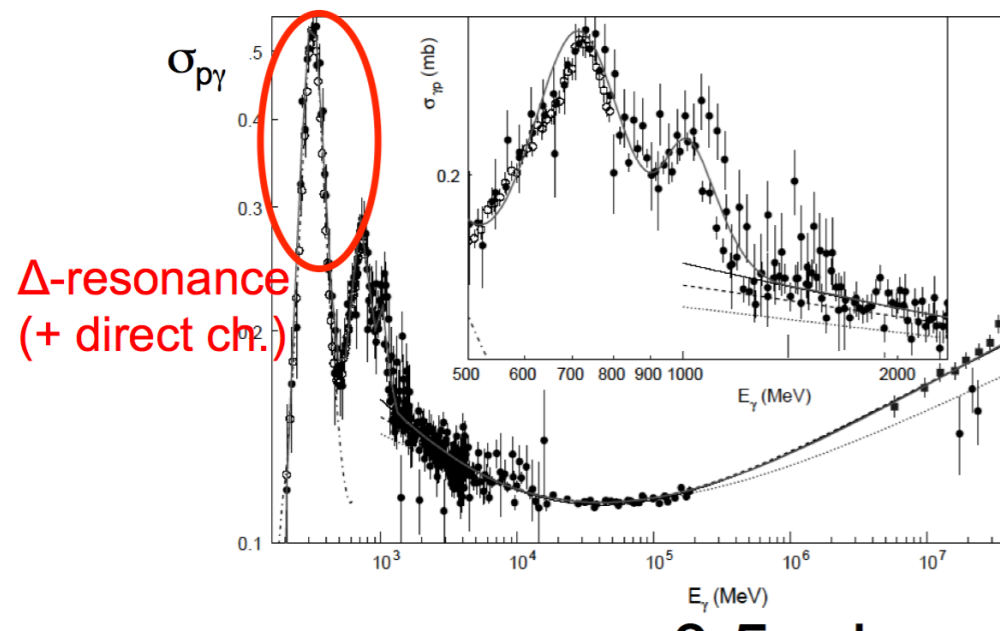
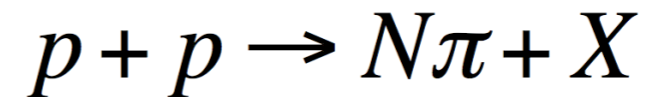
- TeVまでは大気ニュートリノのバックグラウンドが占めるが、それ以上の高エネルギーでは天体ニュートリノ観測のチャンスあり

天体ν生成メカニズム

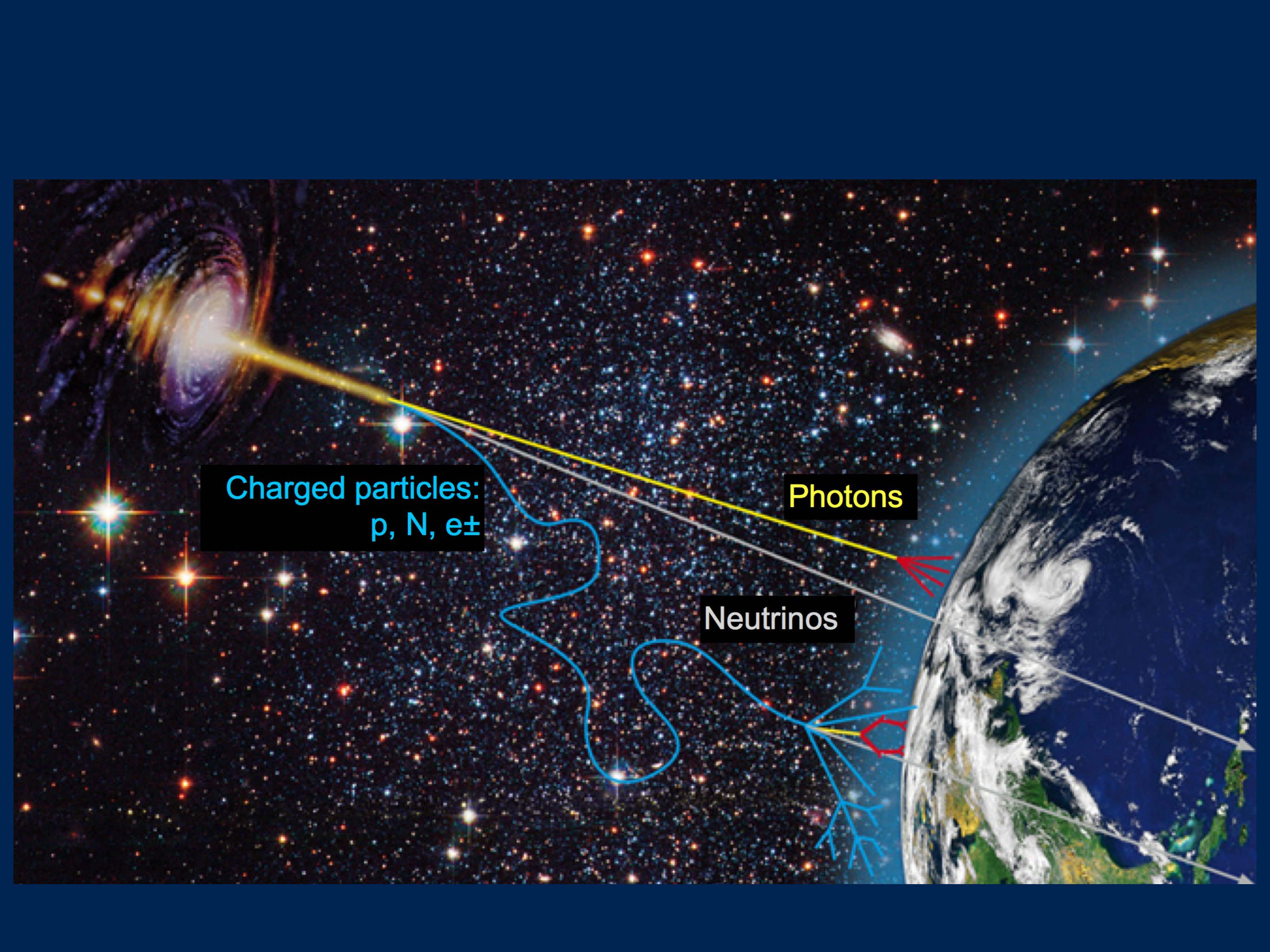
Cosmic-ray Accelerators (ex. UHECR candidate sources)



Cosmic-ray Reservoirs



- 加速された陽子の相互作用により生成される
- 宇宙における陽子加速の直接的証拠、宇宙線の起源



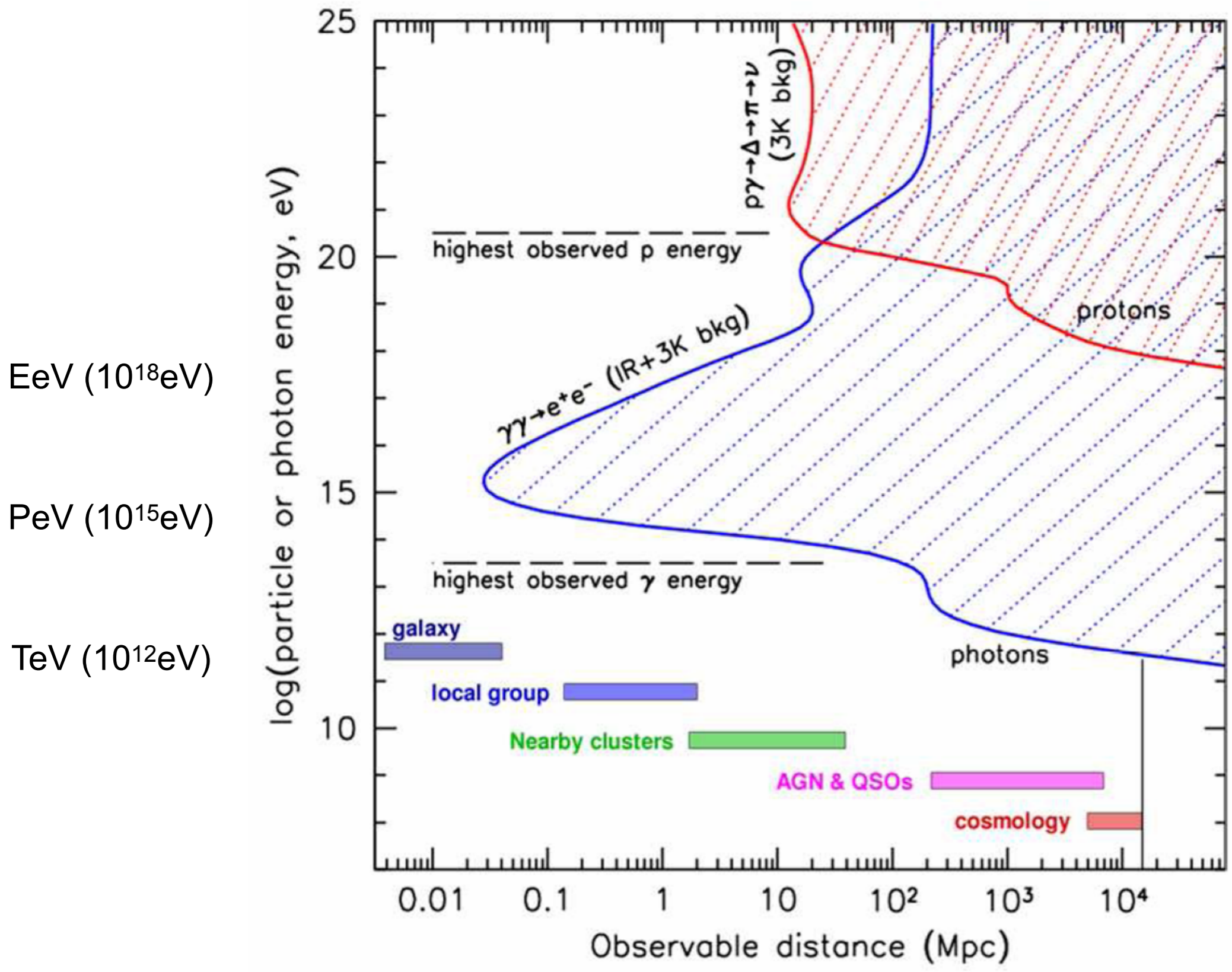
The diagram illustrates the propagation of cosmic rays from a distant galaxy to Earth. A bright yellow beam of light, representing photons, originates from a galaxy on the left and travels in a straight line towards the Earth on the right. A blue wavy line, representing charged particles, also originates from the galaxy but follows a highly irregular, zig-zag path, indicating deflection by magnetic fields. A grey line, representing neutrinos, follows a straight path from the galaxy to the Earth. Labels with arrows identify these three paths: 'Charged particles: p, N, e±' for the blue wavy line, 'Photons' for the yellow straight line, and 'Neutrinos' for the grey straight line. The Earth is shown on the right side of the image, with a white arrow pointing towards it from the right.

Charged particles:
 p, N, e^{\pm}

Photons

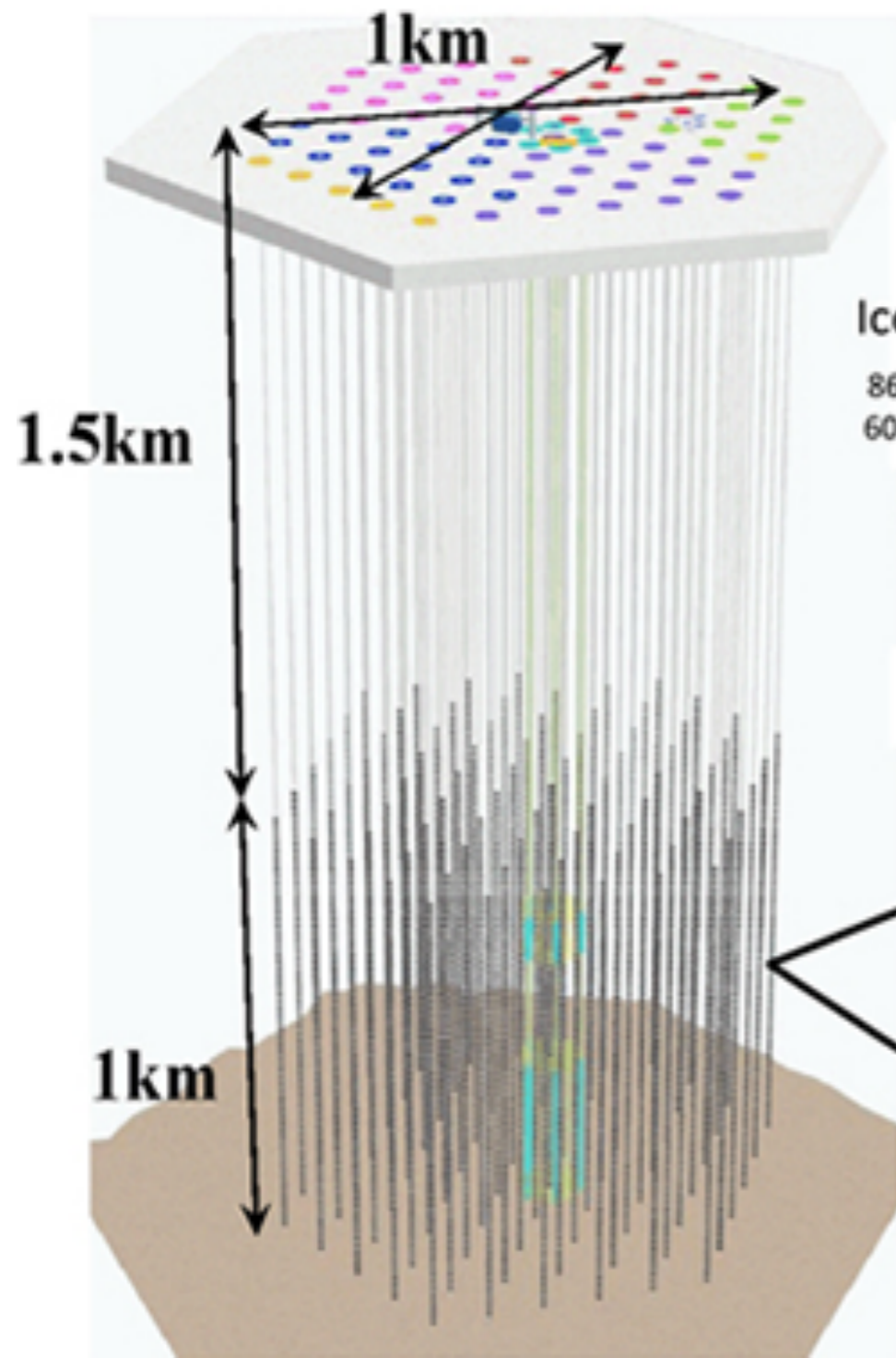
Neutrinos

Observable distance of photon / proton



IceCube

The IceCube Neutrino Telescope

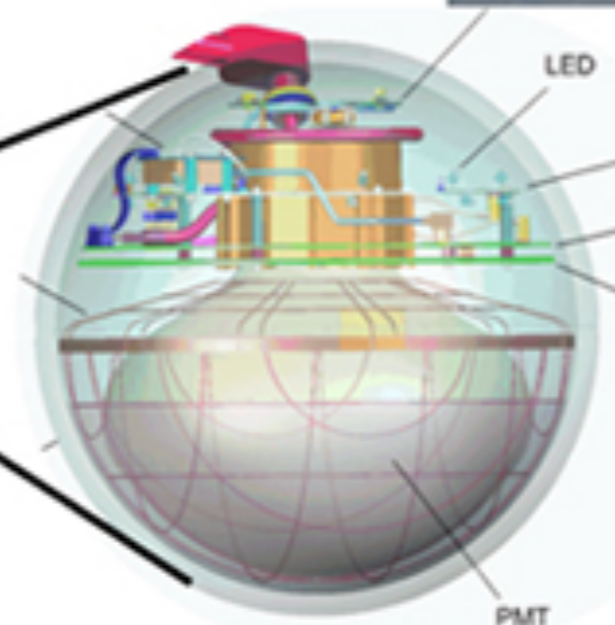


IceCube Array

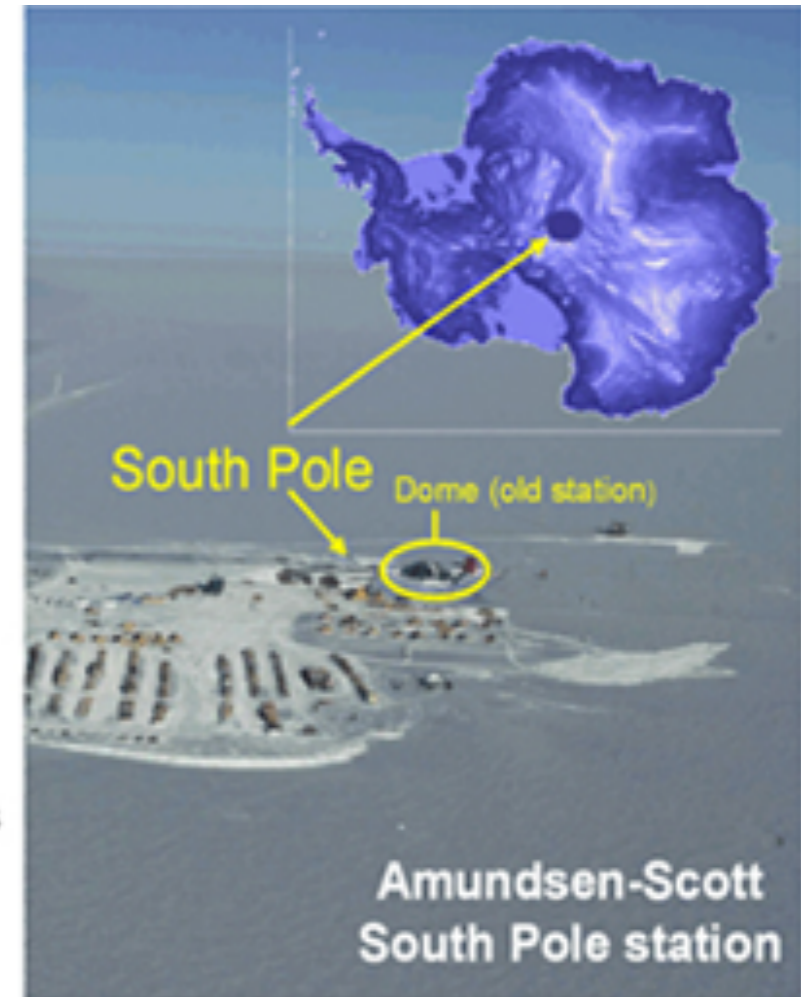
86 strings including 8 DeepCore strings
60 optical sensors on each string

2004: Project Start 1 string
2011: Project completion 86 strings

5160 optical sensors



Digital Optical Module (DOM)





(2012)

Two events passed the final criteria

2 events / 615.9 days (excluding the test-sample livetime)

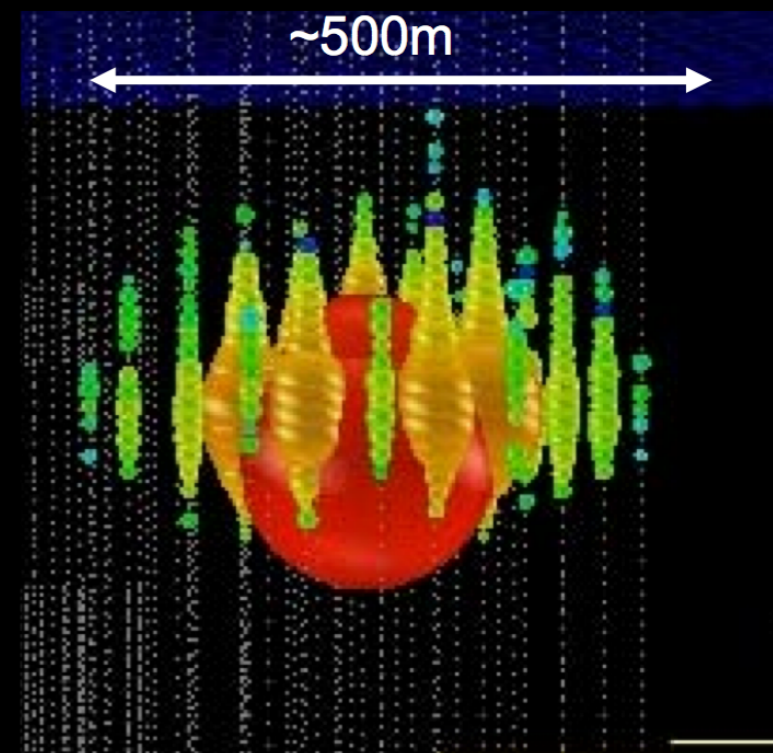
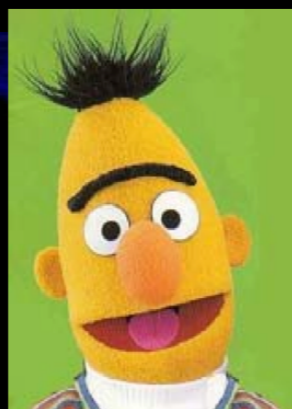
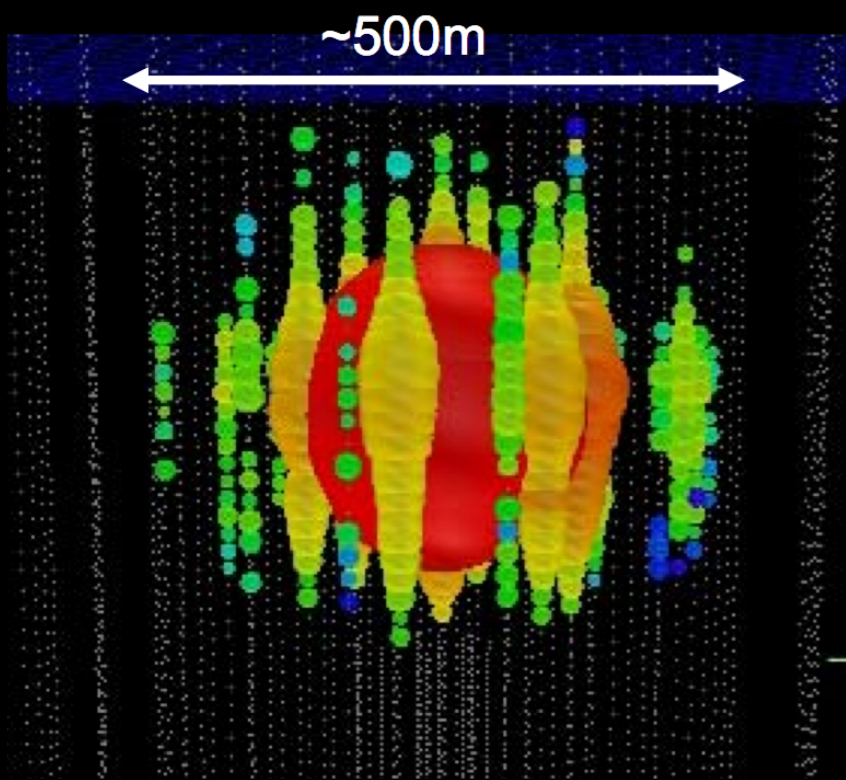
The Expected Backgrounds

including prompt 0.082 $^{+0.041}_{-0.057}$

conventional only 0.050 $^{+0.028}_{-0.047}$

p-value 2.9×10^{-3} (2.8σ)

p-value 9.0×10^{-4} (3.1σ)



Super-nicely contained cascades!

Run118545-Event63733662

August 9th 2011 (“**Bert**”)

NPE 6.9928×10^4

Number of Optical Sensors 354

Run119316-Event36556705

Jan 3rd 2012 (“**Ernie**”)

NPE 9.628×10^4

Number of Optical Sensors 312

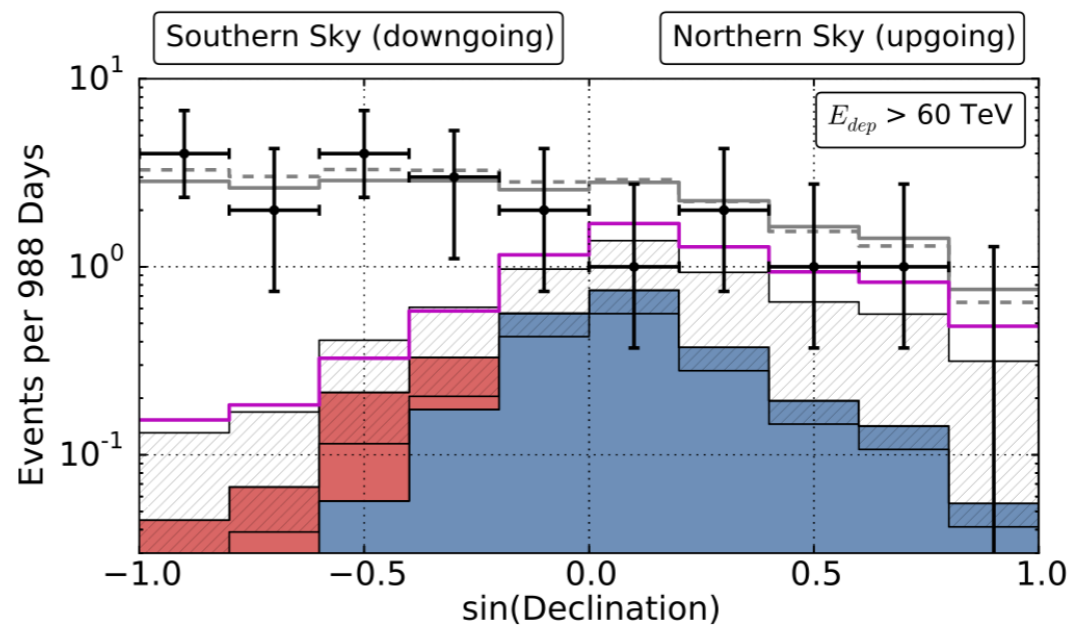
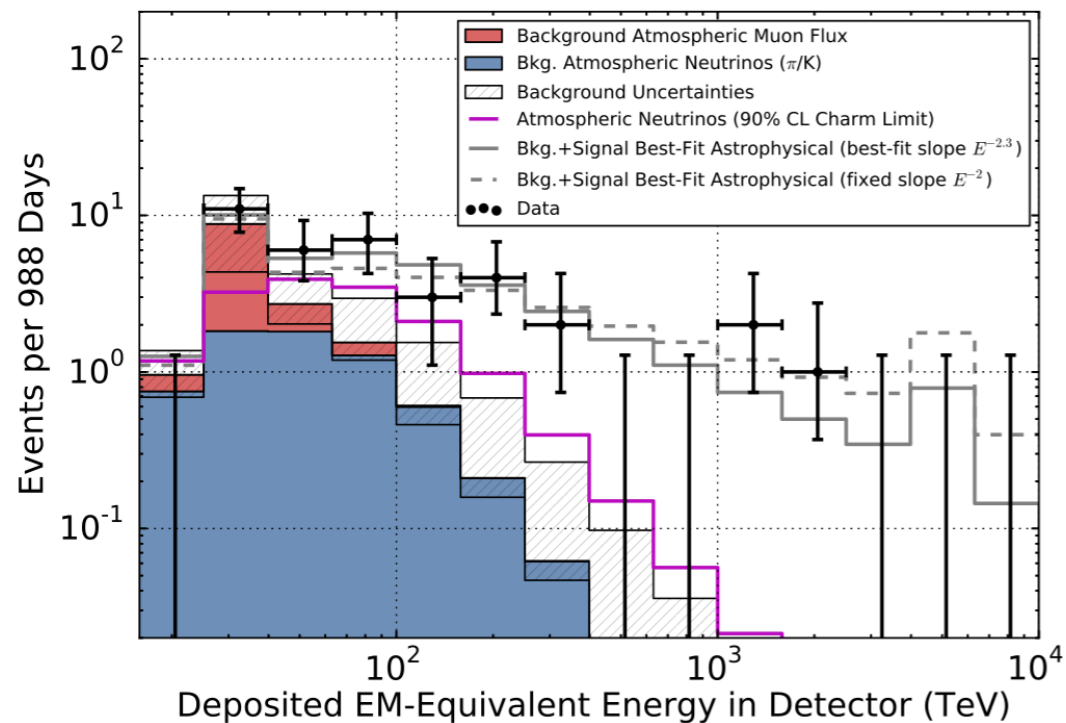
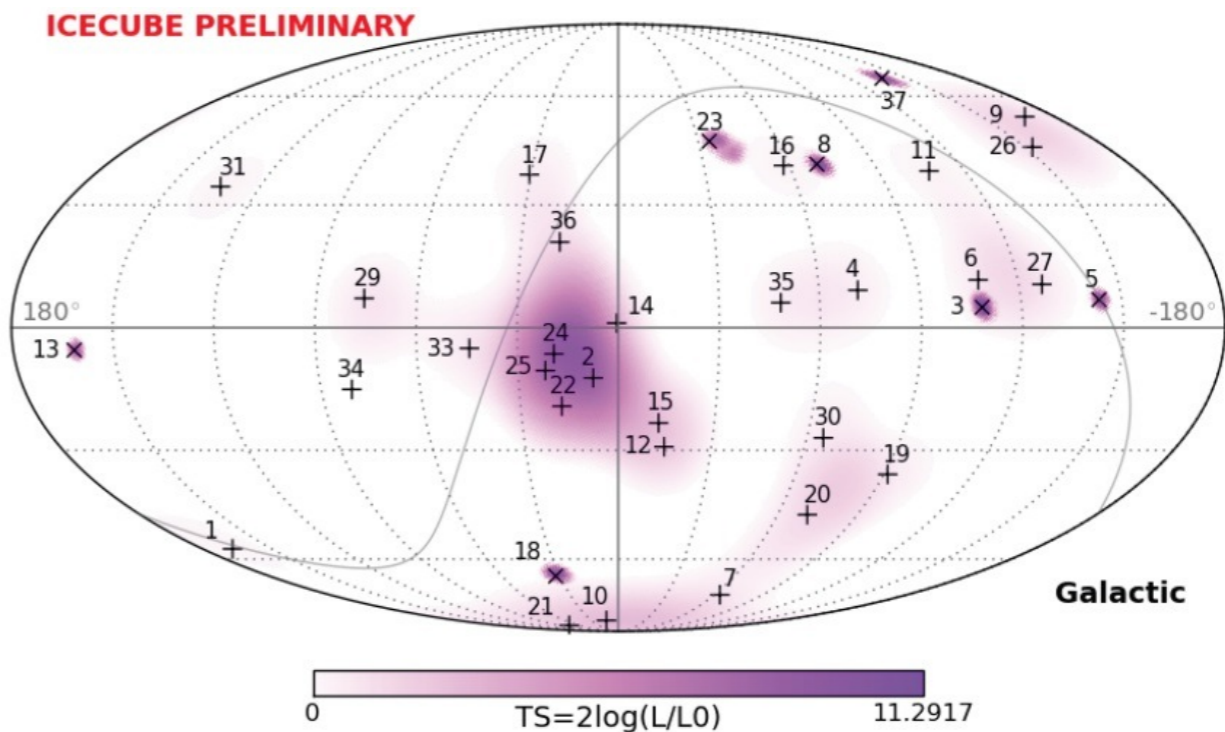
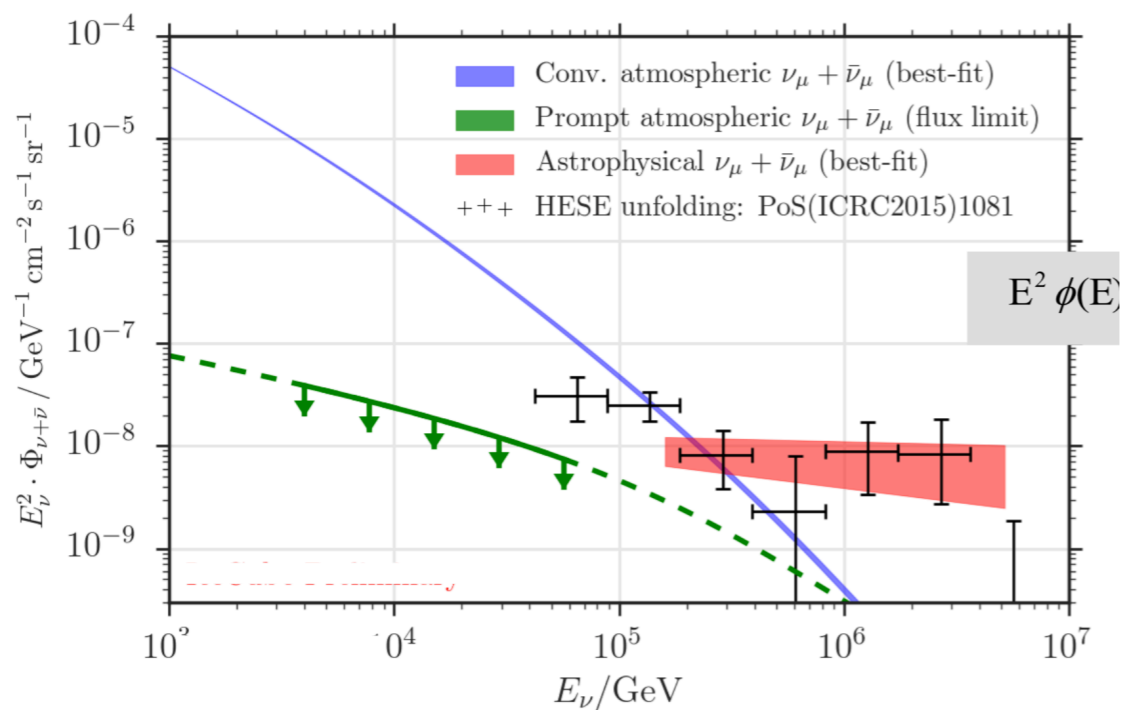
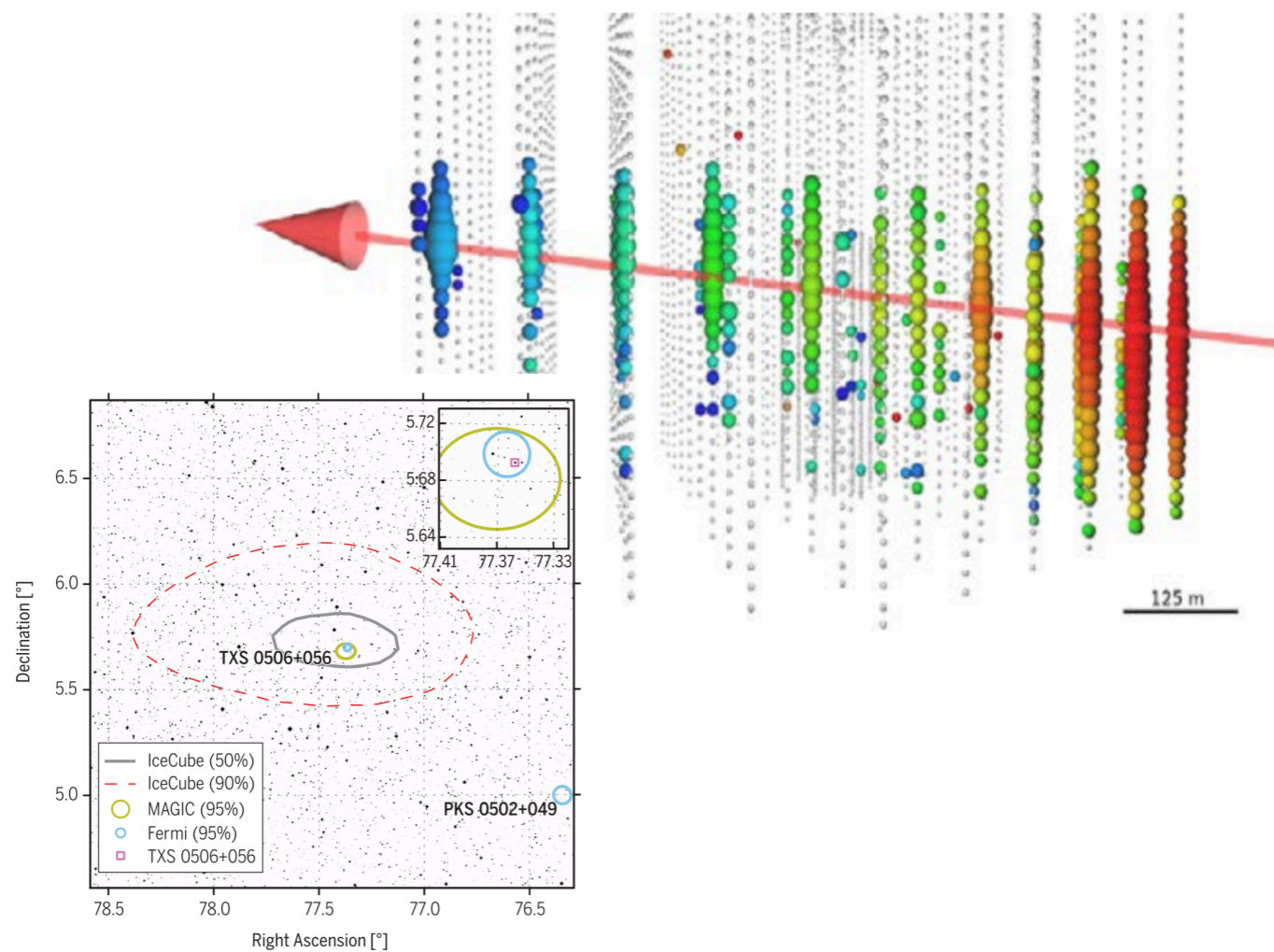


FIG. 3 (color online). Arrival angles of events with $E_{dep} > 60$ TeV as used in our fit and above the majority of



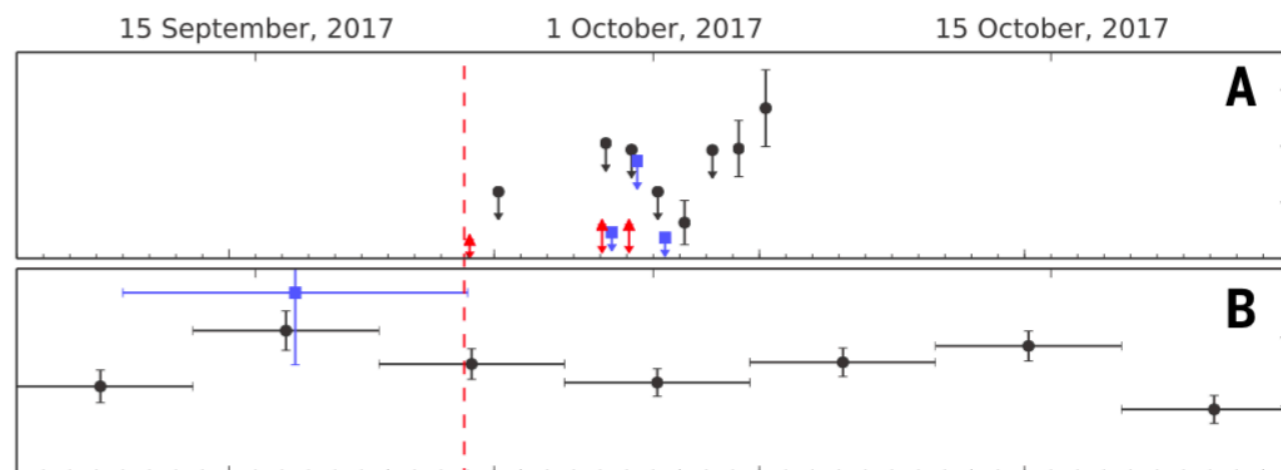
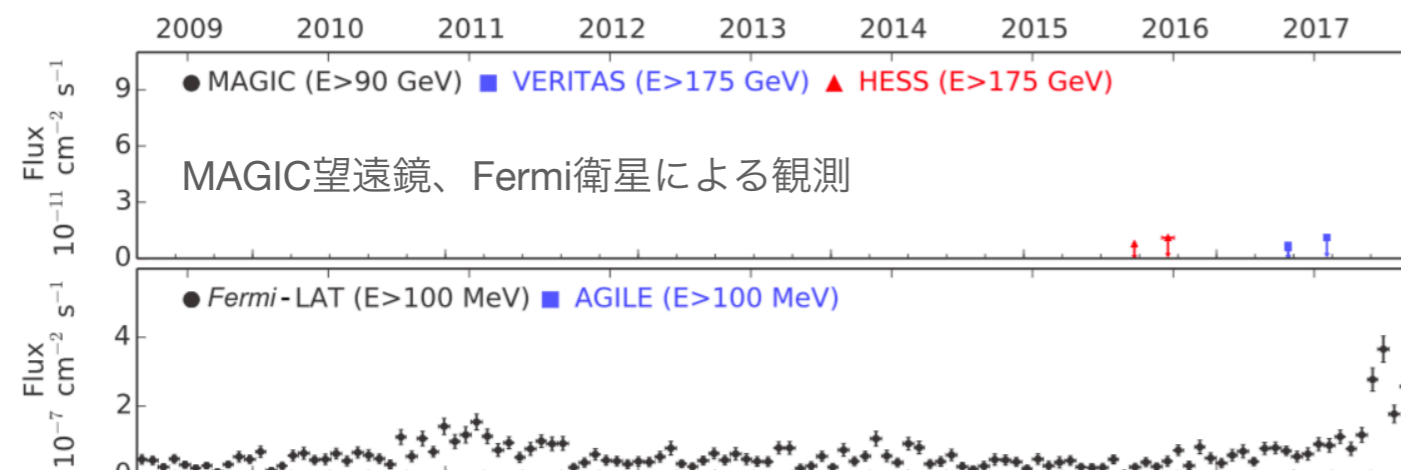
AGNからのニュートリノ検出？



2017年9月にAGN (TXS0506+056) の方向からニュートリノ事象を観測

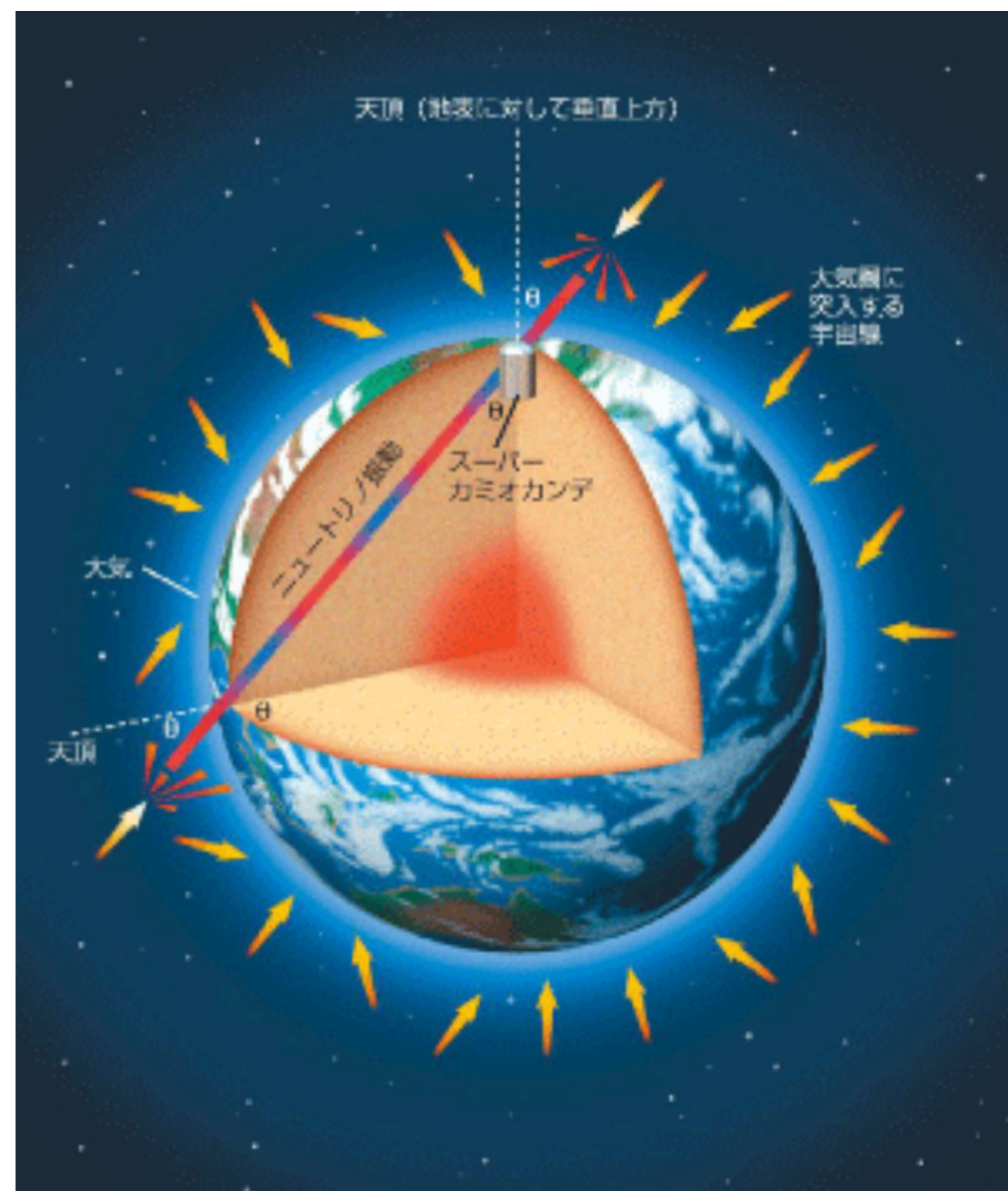
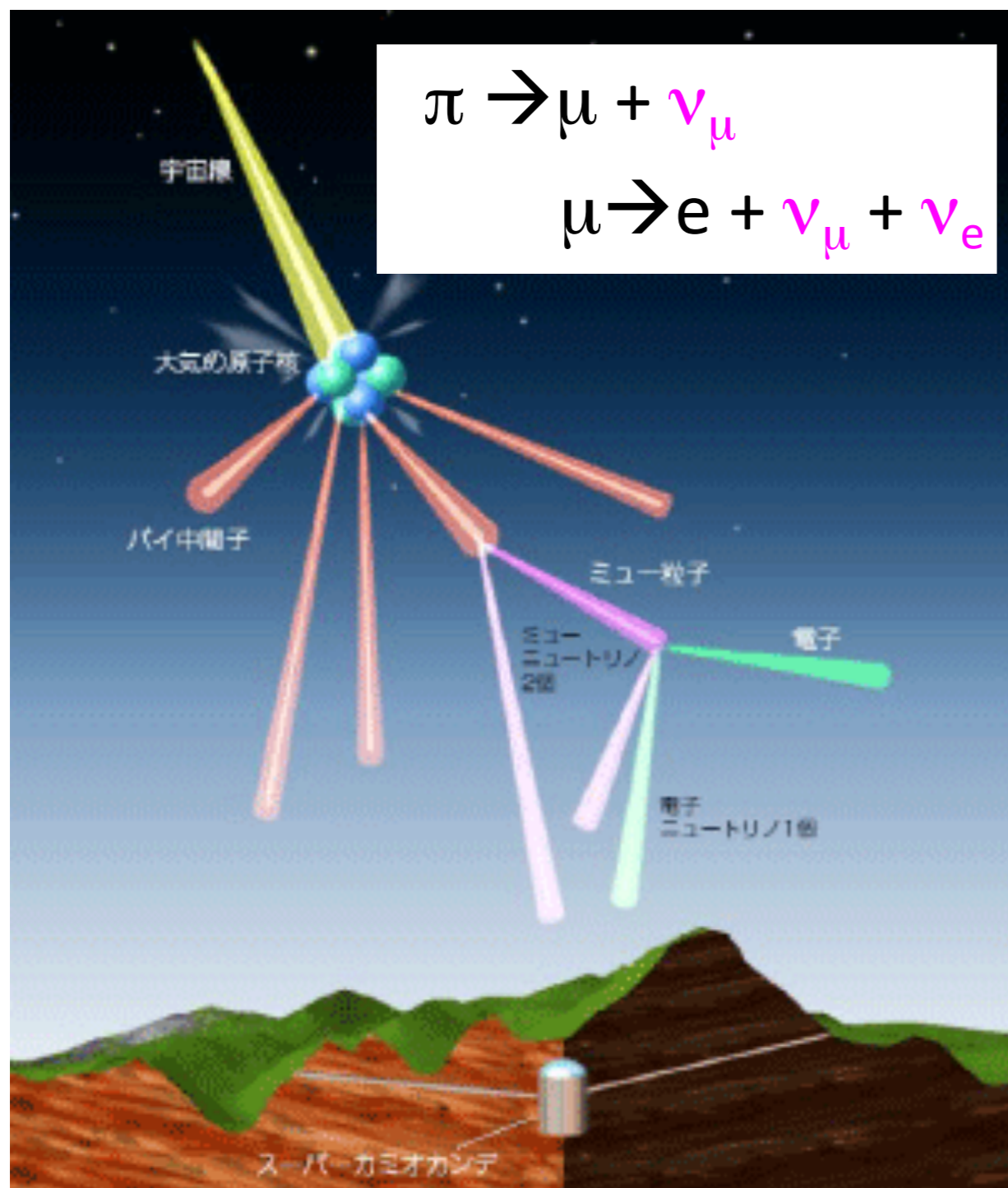
FermiやMAGICでの追観測から、この天体からのGeV-TeVガンマ線が増加していることが判明

放射天体が同定された最初のニュートリノ事象か？



IceCube事象検出

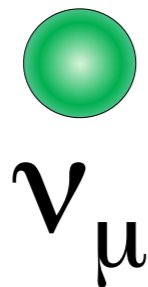
大気ニュートリノ



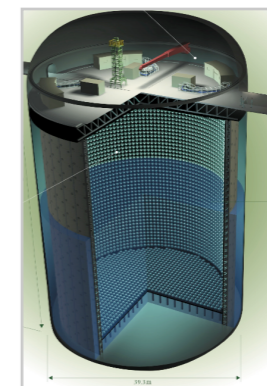
ニュートリノ振動



加速器

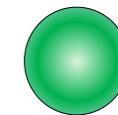


しばらく走った後...

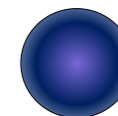


検出器

$1/2 \nu_{\mu}$



$1/2 \nu_{\tau}$



ニュートリノに質量が存在し、フレーバーの固有状態（ニュートリノ反応時の状態）が質量の状態（伝搬時の状態）と異なると、このような振動が起こり得る。

フレーバー

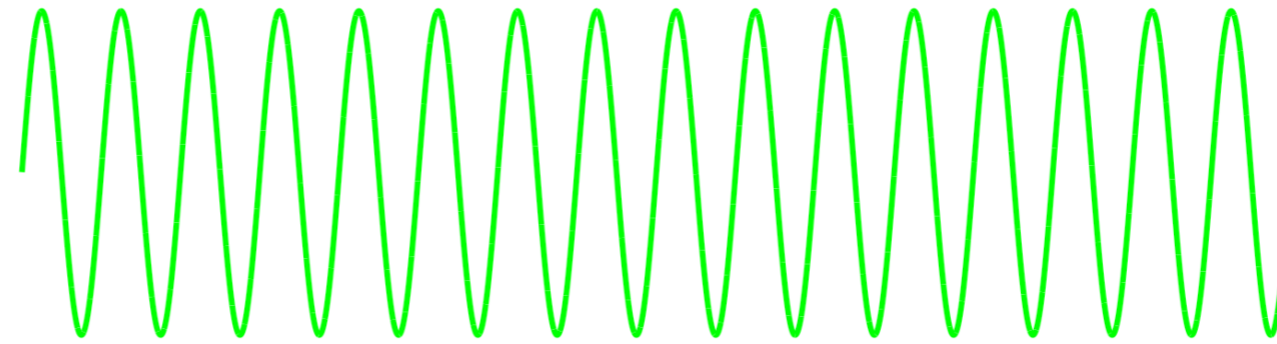
質量

$$\begin{pmatrix} \nu_{\mu} \\ \nu_{\tau} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

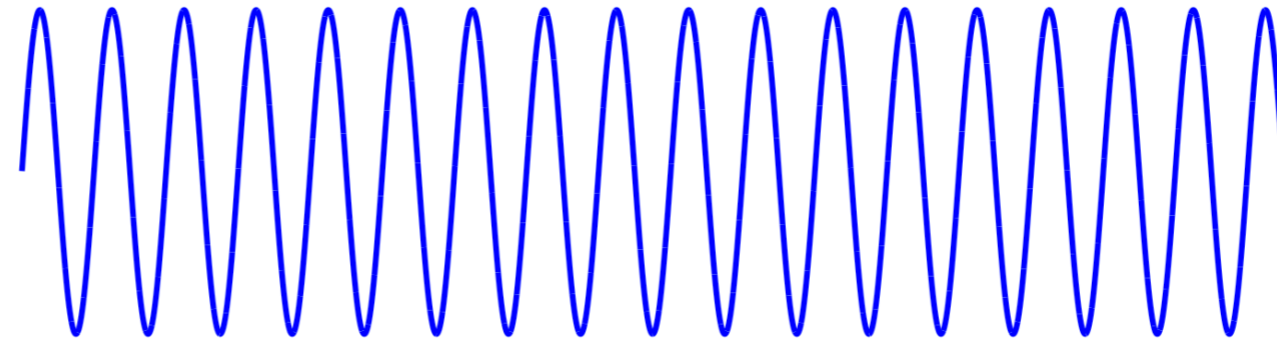
θ : 混合角

距離

v_2 の波



v_3 の波



波長が異なる

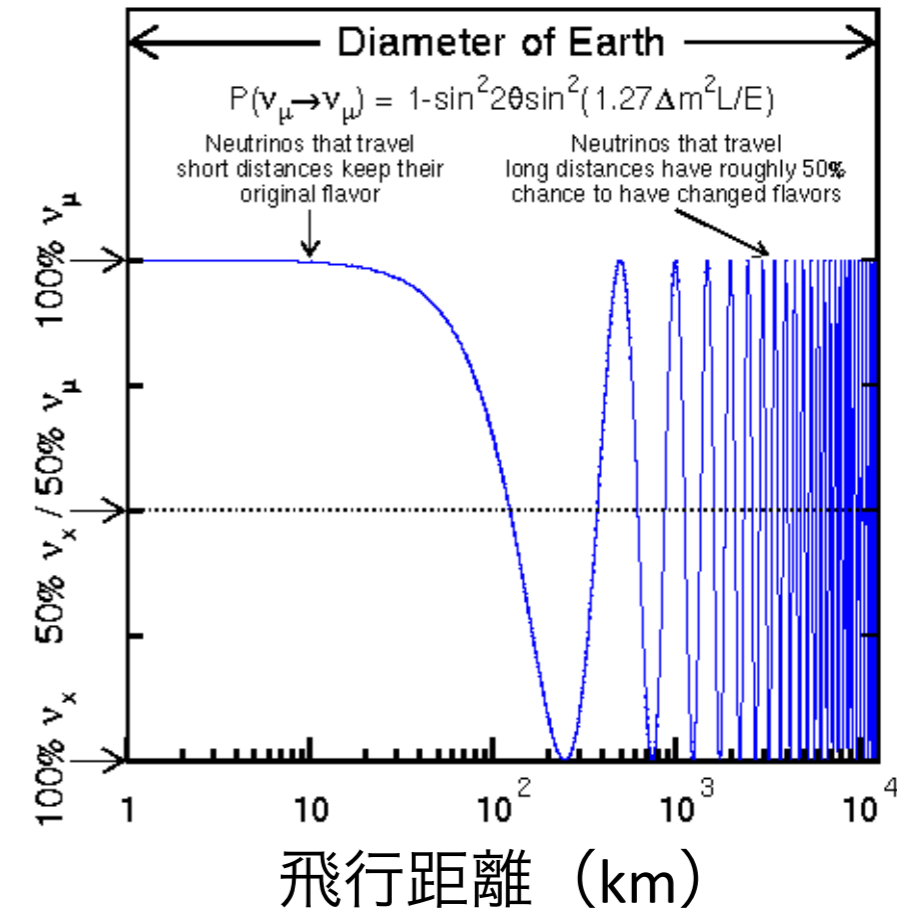
ニュートリノ振動確率

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E}\right)$$

$\Delta m^2 = |m_3^2 - m_2^2|$: 質量自乗差 (eV²)

L : ニュートリノの飛行距離 (km)

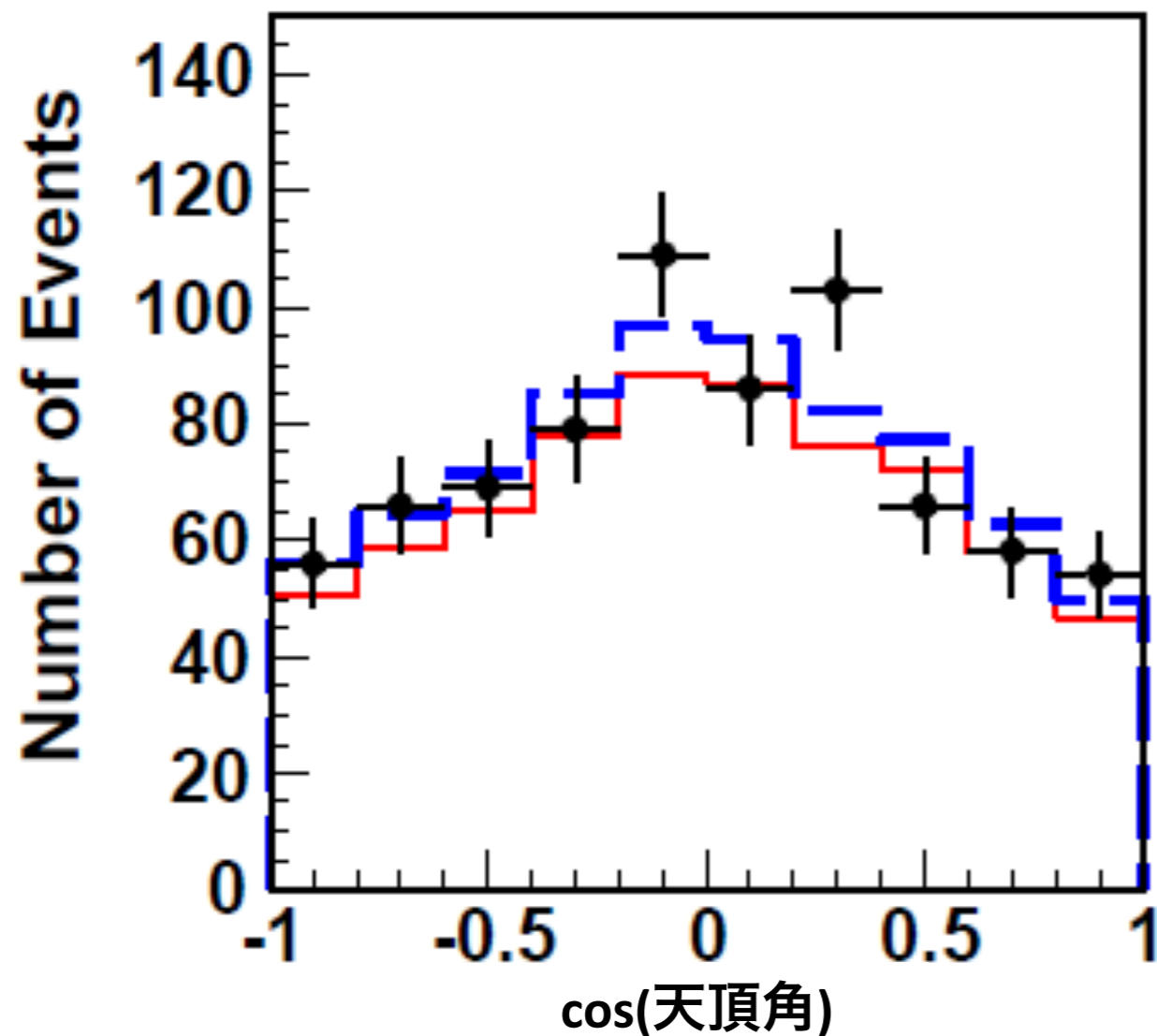
E : ニュートリノエネルギー (GeV)



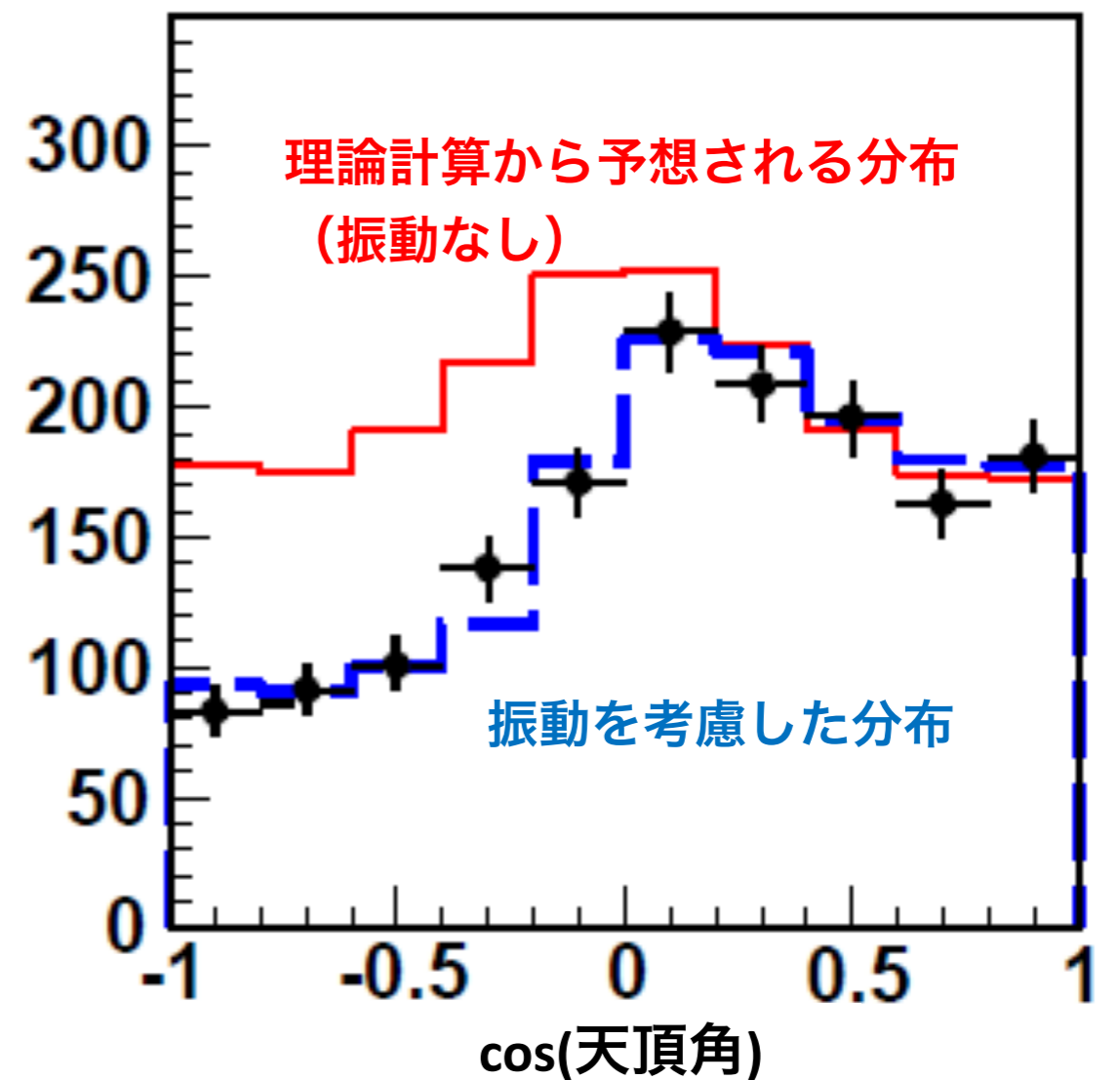
- ・ 距離、エネルギー、質量や混合程度によって振動確率が変わる
- ・ エネルギー大 → 波長大 → 距離が必要

ニュートリノの到来方向分布

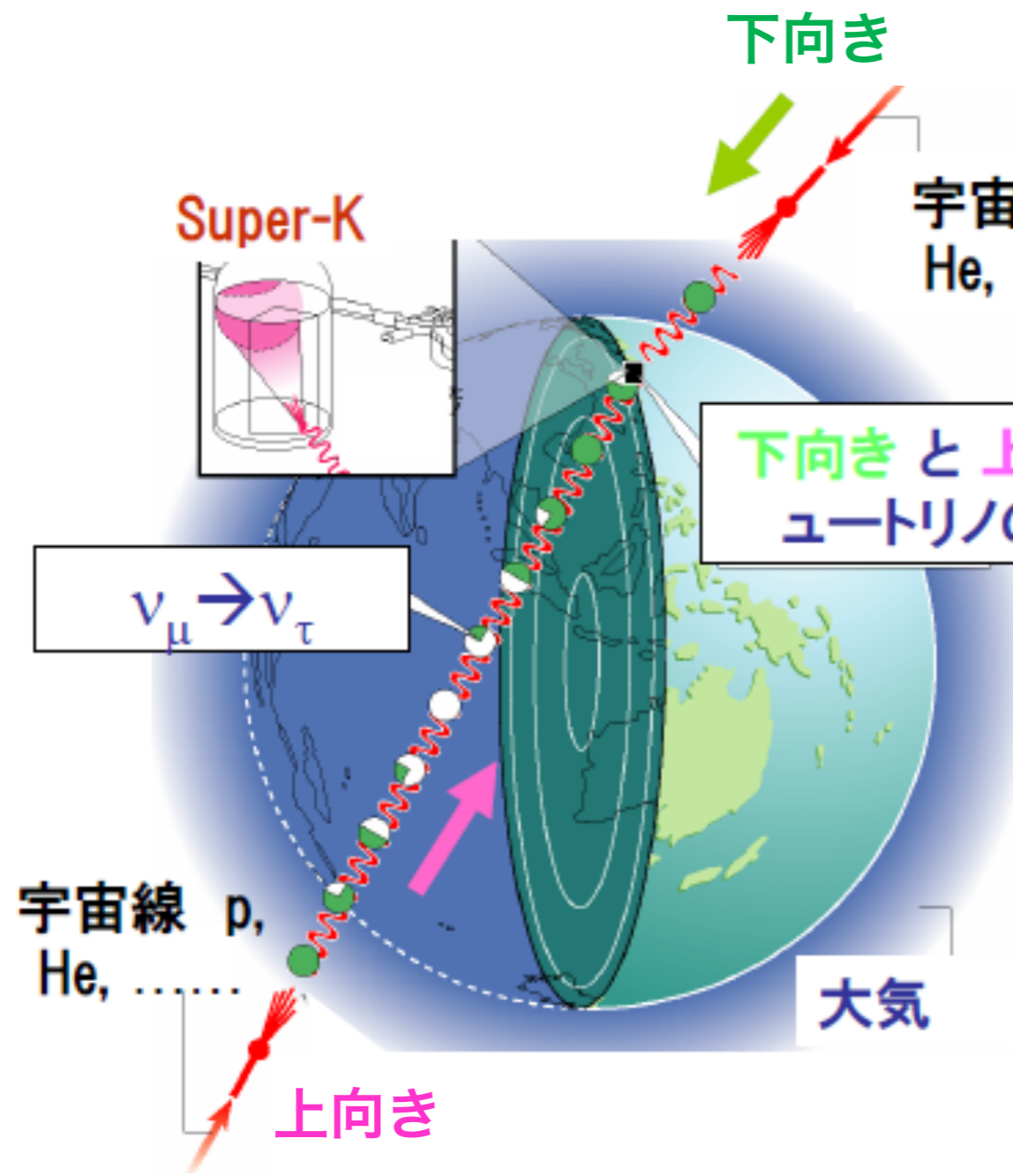
電子ニュートリノ事象
($E > 1.3\text{GeV}$)



ミューニュートリノ事象
($E > 1.3\text{GeV}$)

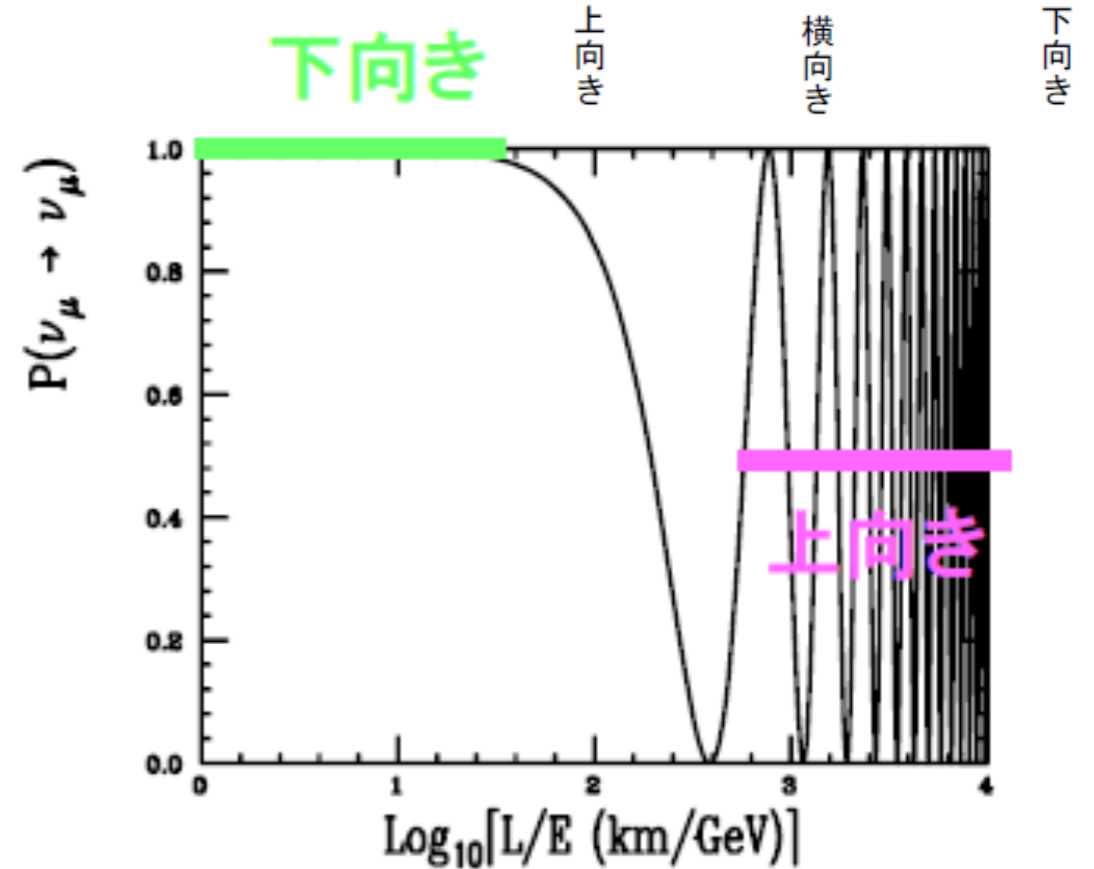
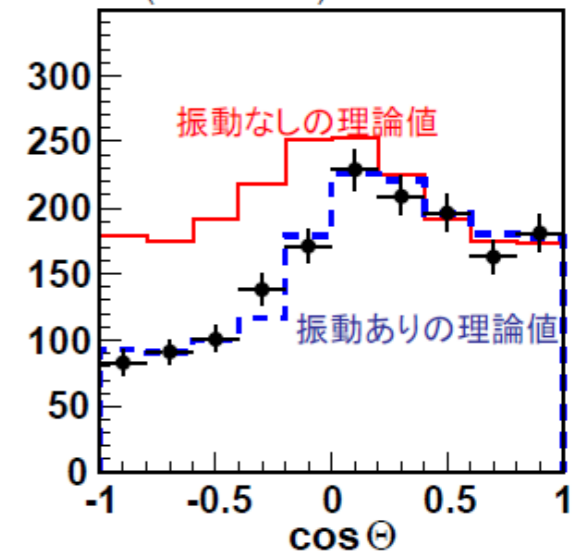


大気ニュートリノデータの解釈



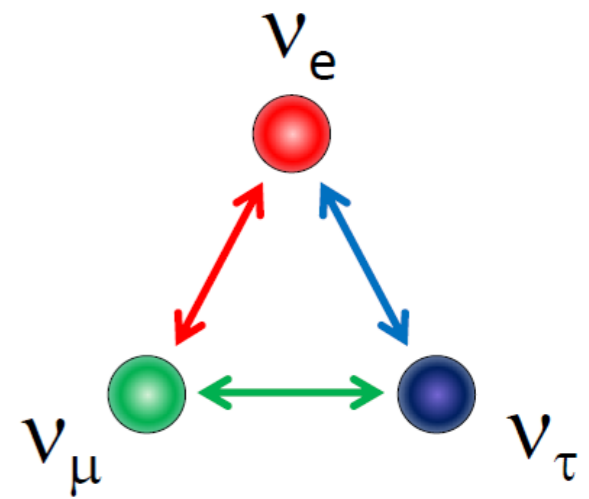
ニュートリノ振動の発見 (1998)

ミューニュートリノ事象 (E>1.3GeV)



ニュートリノは三種類ある！

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

物質と反物質の対称性 (CP対称性) の破れ

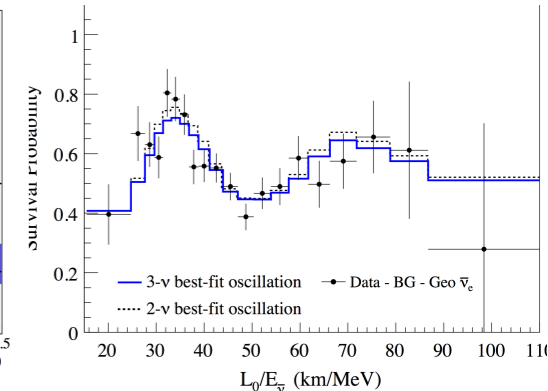
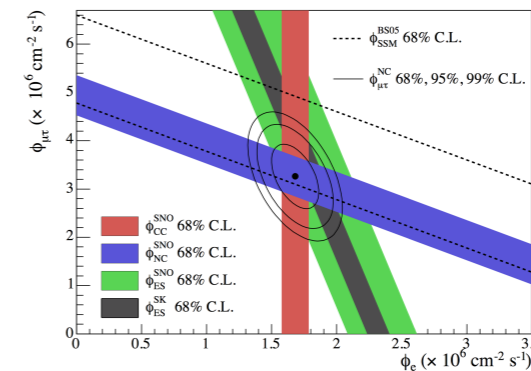
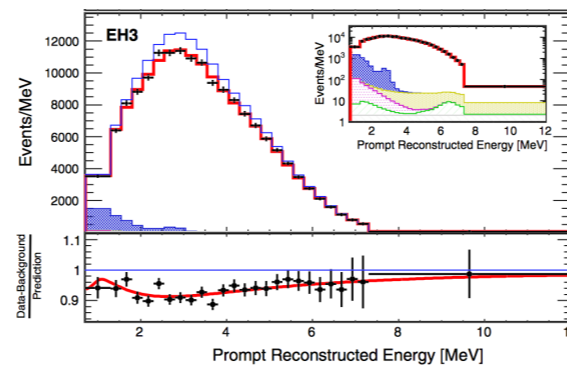
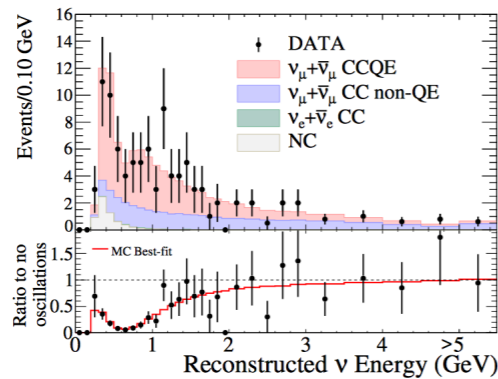
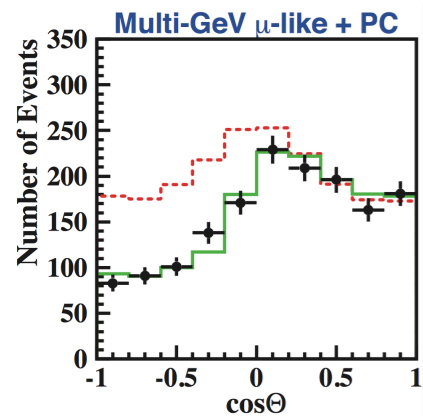
3世代ニュートリノ振動の現状

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{-i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

大気・加速器 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

原子炉 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$
 加速器 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

太陽 $\nu_e \rightarrow \nu_e$
 原子炉 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$



PDG2014 (Normal hierarchy) :

$$\Delta m_{32}^2 = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.437^{+0.033}_{-0.023}$$

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.0234^{+0.0020}_{-0.0019}$$

$$\Delta m_{21}^2 = 7.54^{+0.26}_{-0.22} \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.308 \pm 0.017$$

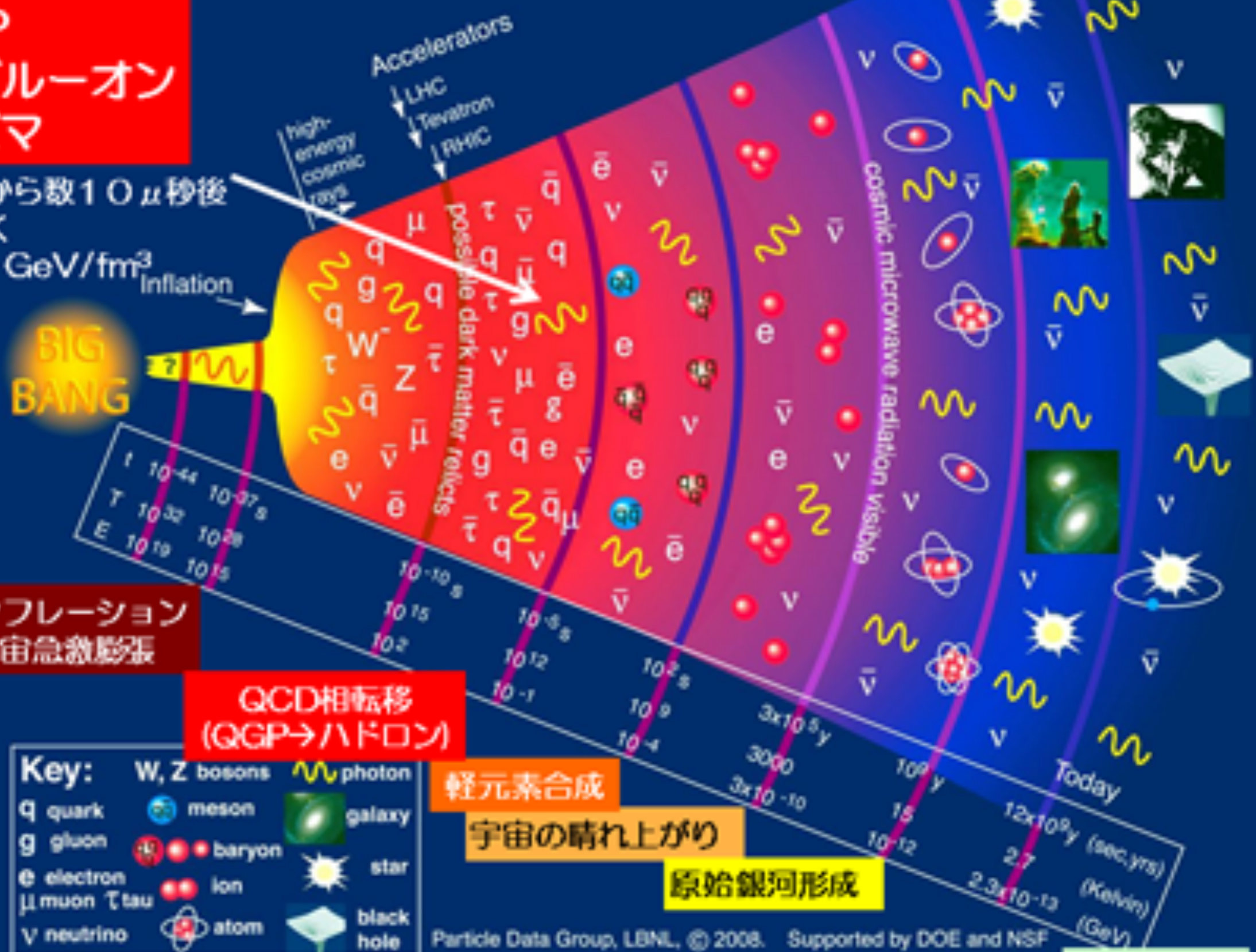
Consistent with three flavor oscillation framework

However CP violating term (δ) still unknown

宇宙の歴史

QGP
クォーク・グルーオン
プラズマ

時間：ビッグバンから数10⁻⁶秒後
温度：2 × 10¹² K
エネルギー密度：1 GeV/fm³



インフレーション
宇宙急激膨張

QCD相転移
(QGP→ハドロン)

軽元素合成

宇宙の晴れ上がり

原始銀河形成

Key:

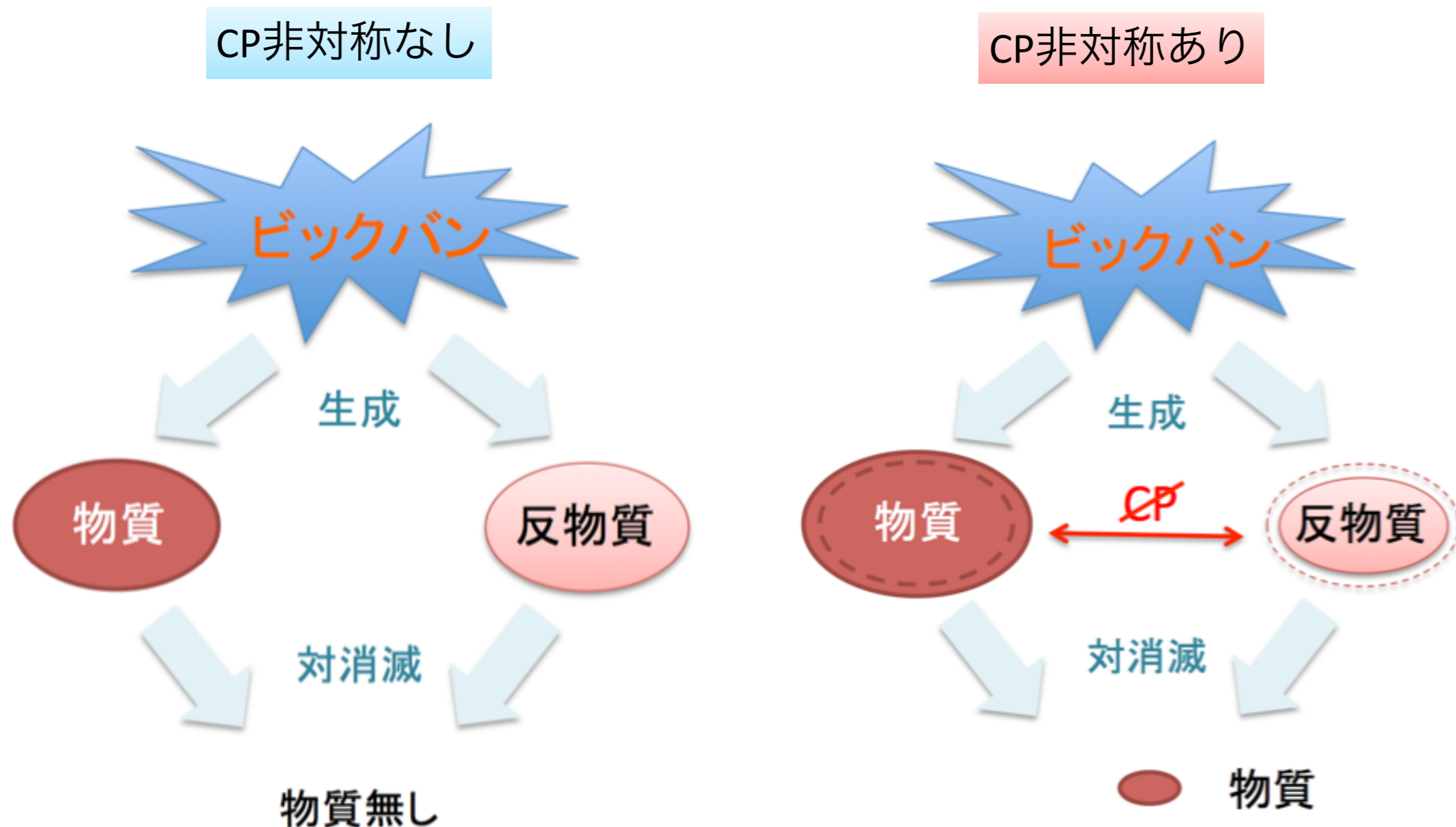
W, Z bosons	photon
quark	meson
gluon	baryon
electron	ion
muon	tau
neutrino	atom
	galaxy
	star
	black hole

Particle Data Group, LBNL, © 2008. Supported by DOE and NSF

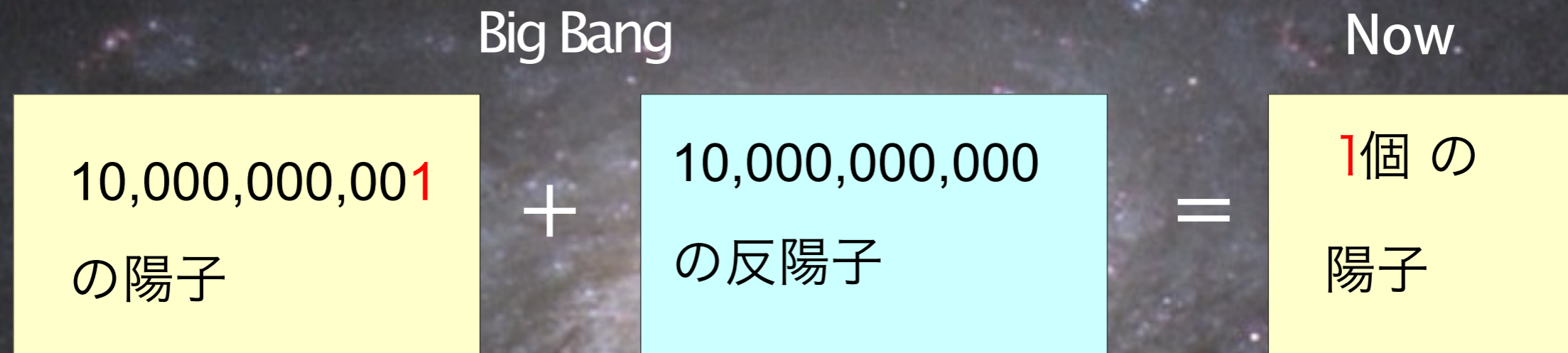
現在の宇宙

CP対称性と宇宙創成

- 物質優勢な宇宙を説明するために素粒子のCP非対称性が必要



Baryon asymmetry in Universe



$$Y_B = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \sim 10^{-10}$$

サハロフの3条件

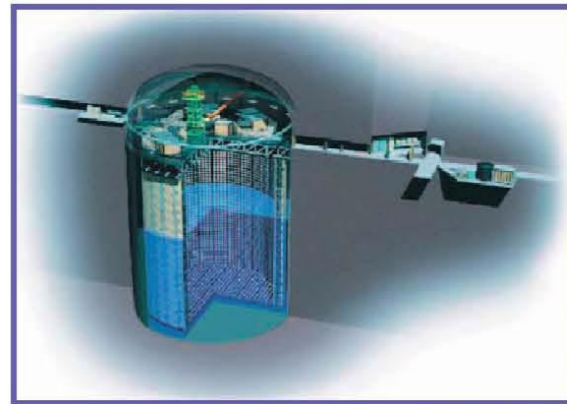
1967年にサハロフが提案した、バリオン非対称（物質優勢）な宇宙を作り出すために必要な条件：

1. 宇宙が非平衡状態にあること
2. バリオン数が保存しないこと
3. CPの破れ（物質・反物質の非対称性）が存在すること



Andrei Sakharov

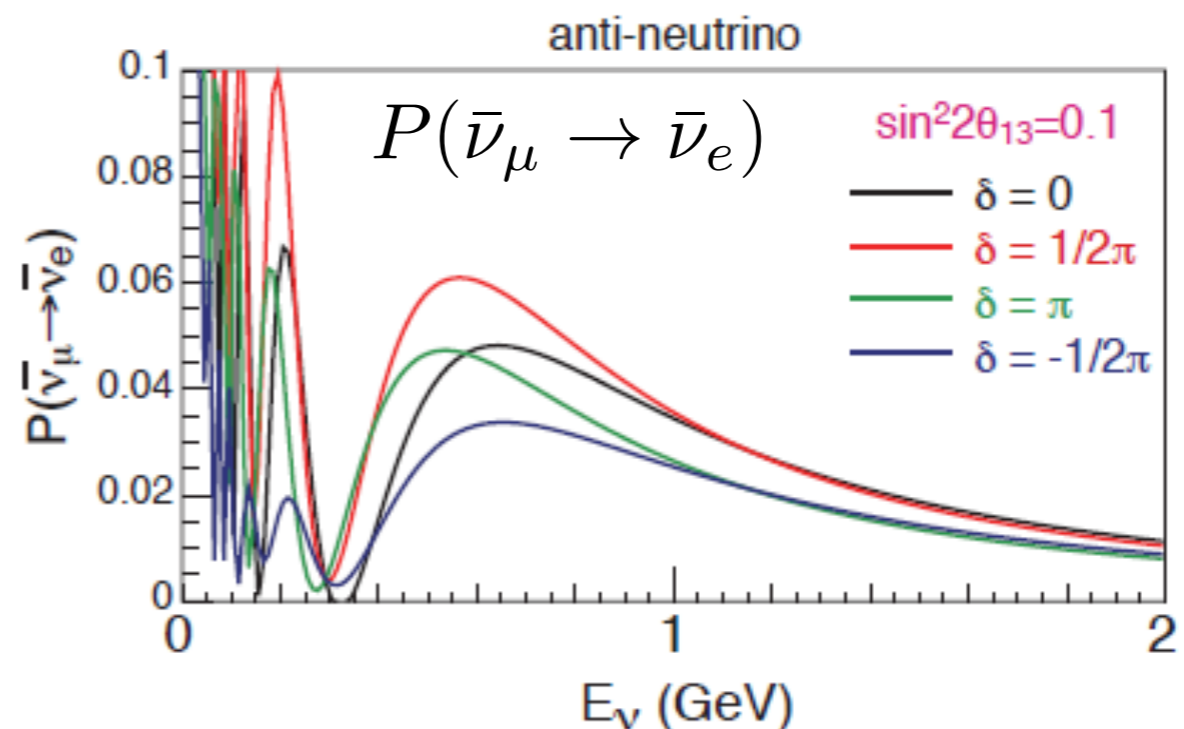
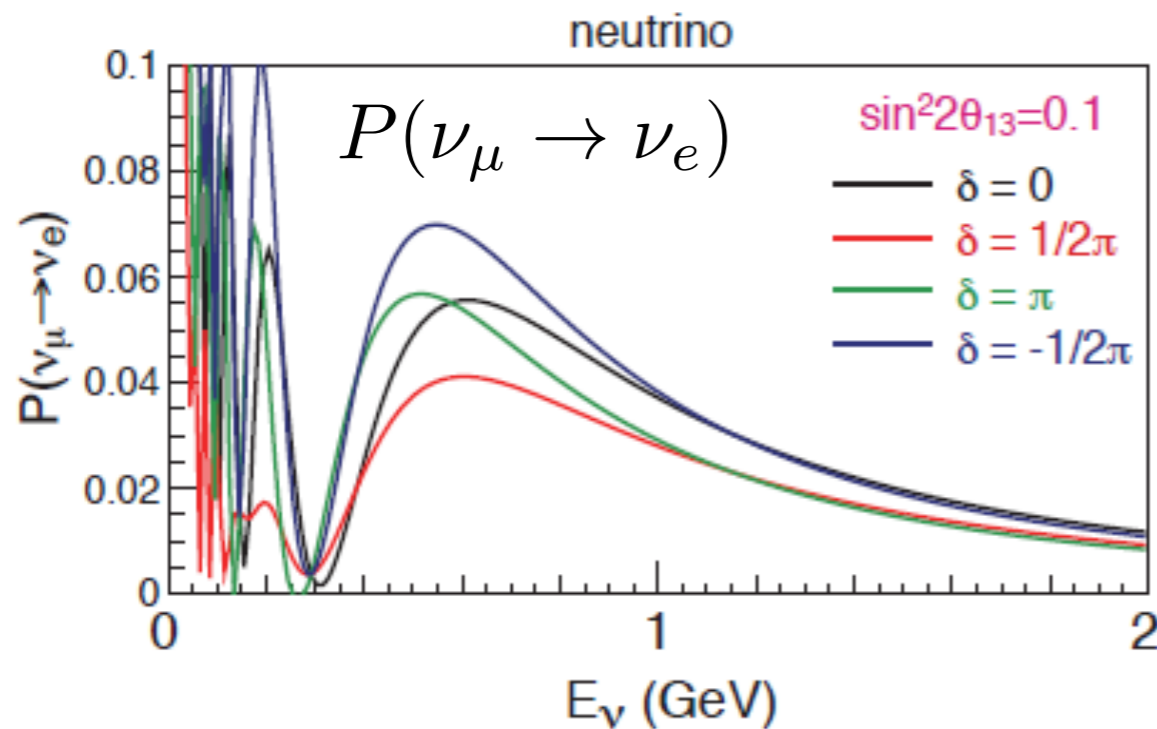
加速器ニュートリノ実験 (T2K)



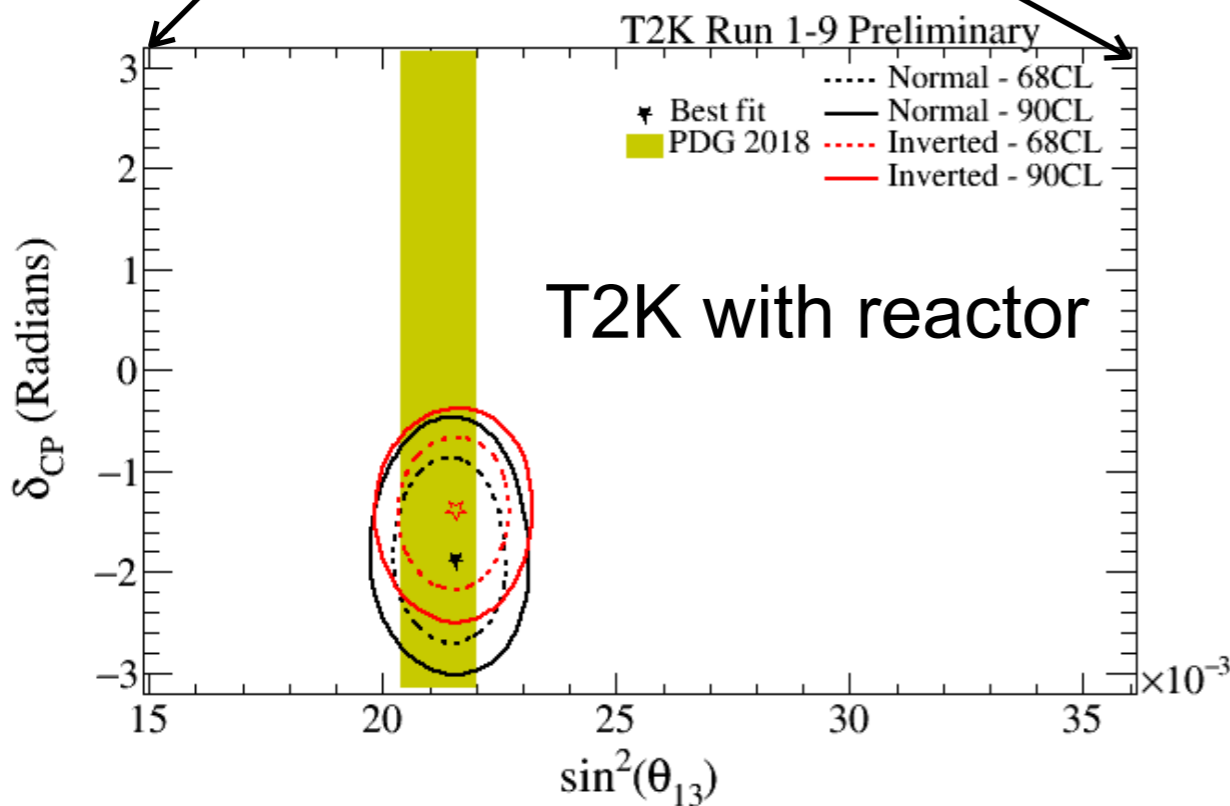
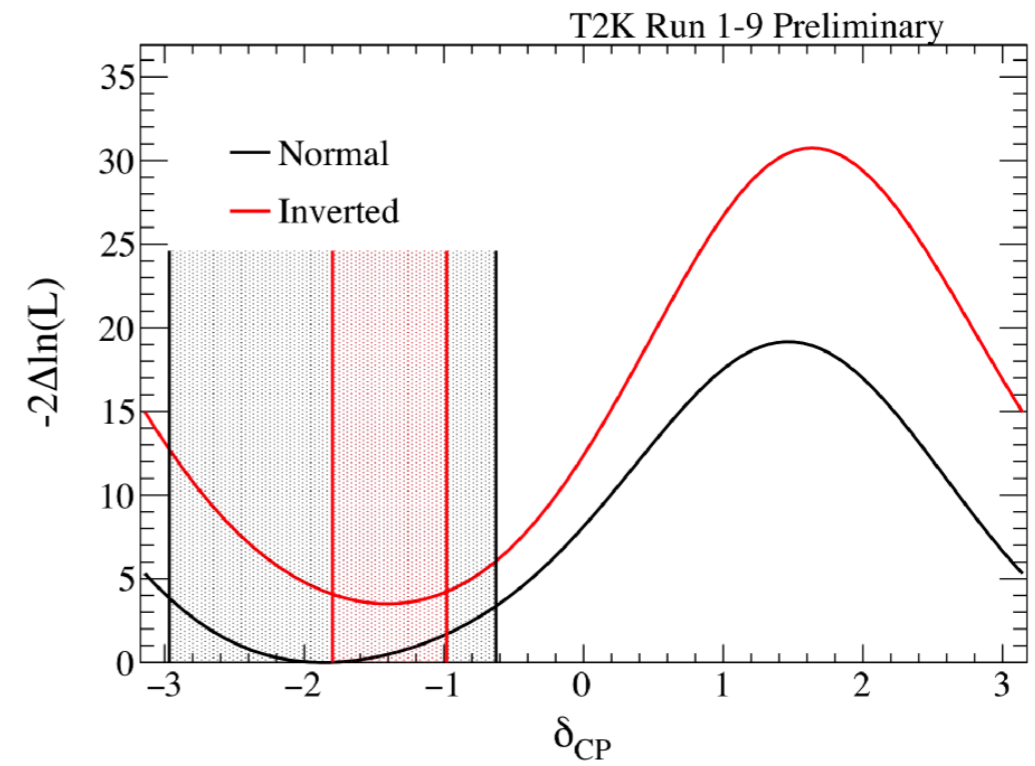
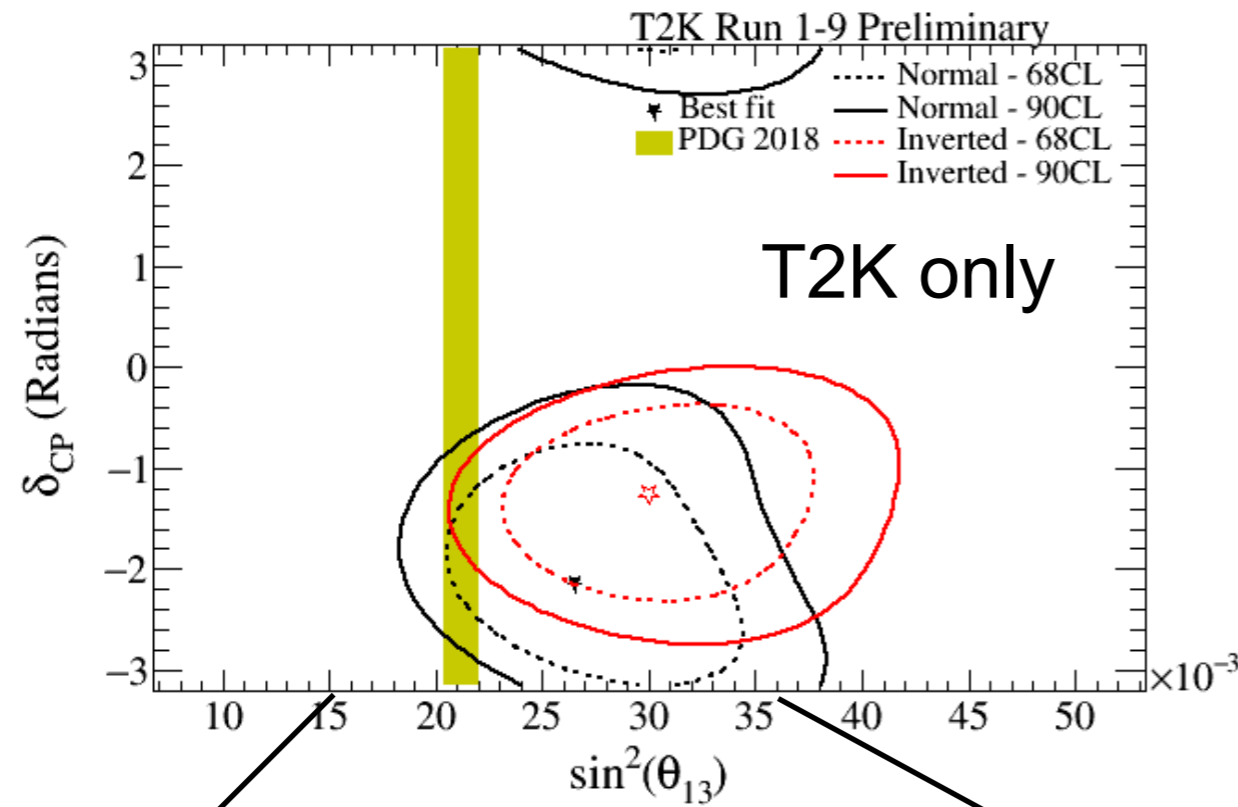
Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)

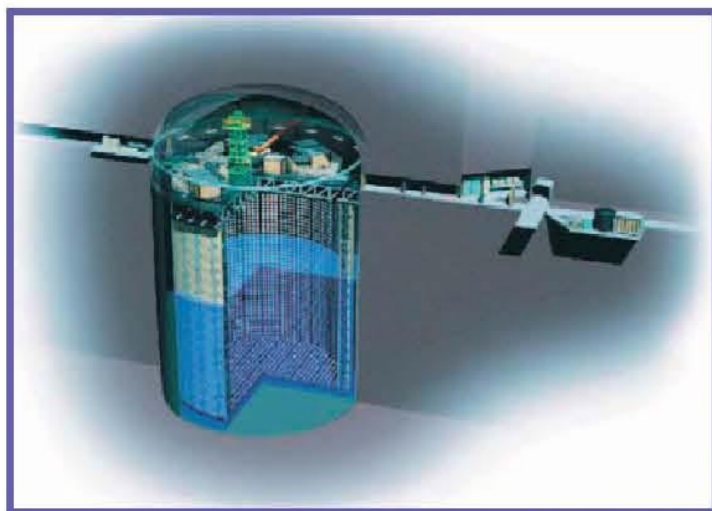


T2K実験によるCPパラメータ測定



- 現状：測定結果がCP対称($\delta_{CP} = 0, \pi$) と約 2σ (2シグマ $\sim 99.5\%$) の信頼度で矛盾する
- 5シグマまで精度を向上し、CPの破れの確立を目指す

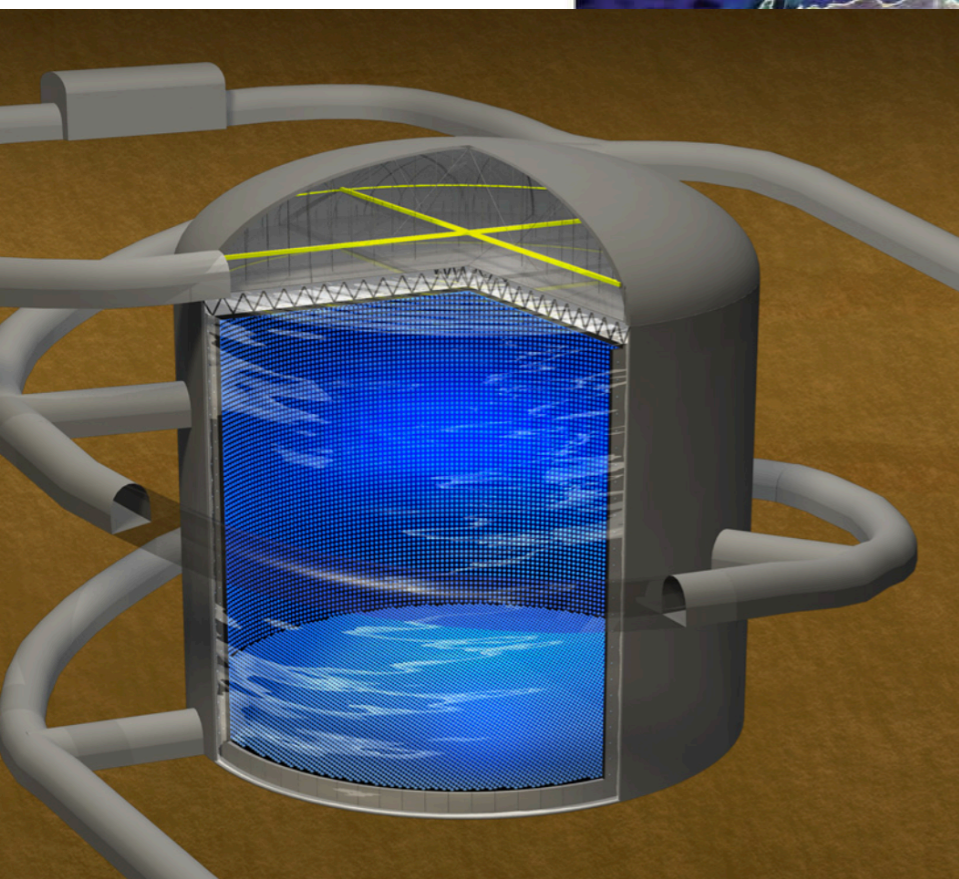
ハイパーカミオカンデ計画



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



Hyper-Kamiokande

まとめ

- 太陽ニュートリノ、超新星（爆発）ニュートリノ
恒星内部の核融合や星の進化を探る
- 天体ニュートリノ
高エネルギー天体での粒子加速のメカニズムを探る
- 大気ニュートリノ、加速器ニュートリノ
ニュートリノ振動の発見、宇宙の物質／反物質非対称の謎を探る
- 超新星背景ニュートリノ
宇宙初期から現在までの星形成の歴史を探る